



# **Betão de Elevado Desempenho Reforçado com Fibras Incorporando Metacaulino**

**MÁRCIA FILIPA SOARES TEIXEIRA**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS**

---

Orientadora: Professora Sandra da Conceição Barbosa Nunes

JUNHO DE 2014

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais









## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à professora Sandra Nunes pela coordenação e orientação dos trabalhos e disponibilidade durante a realização da presente tese.

Um especial obrigada ao Filipe Ribeiro pela disponibilidade, preocupação constante e prontidão em responder a todas as questões e pela orientação laboratorial prestada.

Aproveito este momento para agradecer a todos os professores que passaram pela minha vida como estudante, não só na Faculdade de Engenharia mas também em todos os restantes anos por me incentivarem a melhorar, a aprender, a dar o meu melhor sempre e por serem responsáveis por uma parte significativa da pessoa que sou hoje contribuindo, não só para o meu desenvolvimento intelectual, mas também na minha formação enquanto ser humano.

Por estes maravilhosos anos, quero agradecer à Sara, à Joana e à Ana por me acompanharem nesta jornada tornando-a muito mais divertida. Pela sua amizade e companheirismo que levarei para o resto da vida, sendo que é sem dúvida a elas que devo as melhores risadas e as melhores recordações destes últimos seis anos.

Um especial obrigado ao João e ao Xavier, meus grandes amigos de todas as horas por estarem sempre do meu lado ajudando-me a crescer enquanto pessoa e a ser muito mais feliz pelo simples facto de os conhecer e de ter o privilégio de conviver com eles todos os dias.

Por último, agradeço aos meus pais, os meus heróis, os meus melhores amigos. Por tudo o que têm feito por mim, por fazerem sempre o possível e o impossível para me verem feliz, por estarem sempre presentes nos melhores e nos piores momentos, pela grande oportunidade que me deram de estudar e obter este grau académico dando-me sempre todo o apoio a todos os níveis, mas acima de tudo pelo seu imenso amor e dedicação que me tornaram na pessoa feliz, de valores e princípios que sou hoje.

.



## **RESUMO**

Ainda que não se tenha consciência, o betão é já uma constante no mundo atual, sendo o recurso mais utilizado depois da água. Apesar de ser utilizado com os mais inúmeros fins, desde torres eólicas até grandes obras de arte, o betão continua a ter limitações que restringem o trabalho do engenheiro civil.

Desde sempre o homem mostrou a ambição e determinação de superar obstáculos, como tal e sendo o engenheiro civil, à partida, um amante de desafios as limitações do betão têm vindo a ser superadas ao longo dos anos.

Como é sabido, o betão armado apresenta características que limitam a sua aplicabilidade, como: a baixa resistência à tração e ductilidade, o elevado peso próprio dos elementos estruturais, a sua vulnerabilidade à penetração de substâncias nocivas que aceleram o processo de corrosão das armaduras. Dadas estas limitações, surgiu a necessidade de revolucionar este material contrariando estas características.

Neste seguimento surge o betão de elevado desempenho reforçado com fibras (BEDRF), que culmina num único material as vantagens do betão de elevado desempenho, betão reforçado com fibras e do betão auto-compactável. Este apresenta-se como uma alternativa capaz de resolver os problemas do betão comum, caracterizando-se por uma grande ductilidade, elevada resistência mecânica, baixa relação água/cimento, grande compacidade e resistência à penetração de agentes nocivos.

Surgem, no entanto, problemas económicos e de sustentabilidade deste material, uma vez que os seus custos elevados não permitem ainda uma utilização tão ampla quanto desejável e a utilização de cimento em grandes quantidades contribui para o aumento do CO<sub>2</sub> na atmosfera. Torna-se então essencial encontrar novas adições que possam substituir parte do cimento sem afetar as características do BEDRF.

Neste âmbito, o presente trabalho teve como objectivo o estudo, desenvolvimento e caracterização de composições de betão de elevado desempenho reforçado com fibras incorporando metacaulino, percebendo qual a sua influência a nível mecânico e de trabalhabilidade deste material, numa tentativa de o tornar mais económico e eco-eficiente. Os trabalhos desenvolvidos permitiram determinar uma composição óptima, com uma baixa razão água/cimento, uma percentagem razoável de metacaulino e de fibras, mantendo uma boa trabalhabilidade. A solução obtida foi comparada com outras desenvolvidas em paralelo com sílica de fumo e pó-de-vidro, pelo que se pôde concluir que a incorporação de metacaulino não teve uma influência mecânica significativa, através de ensaios Double Edge Wedge Splitting..

Ainda na continuidade deste trabalho, estudou-se a influência de fibras de tamanhos diferentes, bem como a influência da orientação ou aleatoriedade da distribuição das fibras, concluindo-se que a orientação das fibras é um fator determinante na resposta mecânica do material. Através de ensaios de permeabilidade magnética estudou-se a influência do tamanho e da percentagem das fibras na distribuição e orientação dentro da matriz com metacaulino, percebendo-se que as fibras de menor comprimento se distribuem de forma mais homogênea e são mais facilmente orientáveis.

**PALAVRAS-CHAVE:** BEDRF, metacaulino, DEWS, orientação das fibras, permeabilidade magnética.



## **ABSTRACT**

Although most people are not aware, concrete is already a constant in today's world, being the most used resource after water. Despite being used for numerous purposes, from wind towers to large bridges, concrete continues to have limitations that restrict the work of the civil engineer

Man has always shown the ambition and determination to overcome obstacles, and as such, a civil engineer, at the outset a lover of challenges, has been overcoming the limitations of concrete along the years

As is known, concrete has characteristics that limit its applicability, such as low tensile strength and ductility, the excessive weight common to structural elements, its vulnerability to penetration of harmful substances that accelerate the process of corrosion of the reinforcement. Given these limitations, it was needed to revolutionize this material material contradicting these characteristics.

Following this there is high performance concrete reinforced with fibers, which culminates the advantages of high performance concrete, fiber reinforced concrete and self-compacting concrete in a single material. This material presents itself as an alternative capable of solving the problems of ordinary concrete, in a single material characterized by high ductility, high strength, low water / cement ratio, great compactness and resistance to penetration of harmful agents.

However, economic sustainability and problems related to this material arise seeing that it's high cost does not allow for as broad use as desirable and also the use of cement in bulk contribute to the increase of CO<sub>2</sub> in the atmosphere. It is thus essential to find new additions that can replace part of the cement without affecting its characteristics.

In this context the present work had as objective the study of the development and characterization of concrete mixtures of high performance reinforced with fiber incorporating metakaolin, understanding the workability of this material in an attempt to make it more economic and eco-efficient. The work developed allowed to determine an optimum composition, with a low water / cement ratio, a reasonable percentage of metakaolin and fiber, while maintaining good workability. The solution obtained was compared with others developed simultaneously with silica fume and sand-glass, and the conclusion was that the incorporation of metakolin didn't feature a significant mechanical influence.

Sequentially, we studied the influence of different fiber size was studied, as well as the influence of the orientation or randomness of fiber distribution, concluding that the fiber orientation is a determining factor in the mechanical response of the material. Through magnetic permeability tests the influence of the size and the percentage of fibers in the distribution and orientation within the matrix with metakaolin were studied, perceiving that the shorter fibers are distributed more evenly and are more easily orientated.

**KEYWORDS:** HPFRC, METAKAOLIN, DEWST, FIBERS ORIENTATION, MAGNETIC PERMEABILITY





## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	i
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. ÂMBITO E OBJETIVOS DO TRABALHO .....	1
1.2. PLANO DE TRABALHOS .....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	2
<b>2 Betão de Elevado Desempenho Reforçado com fibras</b> .....	5
2.1 INTRODUÇÃO .....	5
2.2 BETÃO DE ELEVADO DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS .....	6
2.2.1 APLICAÇÕES DO BEDRF .....	6
2.3 BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL .....	9
2.4 UTILIZAÇÃO DO METACAUPLINO NO BEDRF .....	9
2.4.1 HISTÓRIA, PRODUÇÃO E COMPOSIÇÃO DO METACAUPLINO .....	9
2.4.2 INTRODUÇÃO DO METACAUPLINO NO BETÃO .....	11
2.4.3 METACAUPLINO EM PORTUGAL .....	12
2.5 COMPOSIÇÃO TÍPICA .....	13
2.5.1 INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS .....	17
2.6 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO .....	18
2.7 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO .....	19
2.7.1 ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAxIAL .....	20
2.7.2 WEDGE SPLITTING TEST .....	21
2.7.3 DOUBLE-EDGE WEDGE SPLITTING TEST .....	22
<b>3 ESTUDO DA COMPOSIÇÃO</b> .....	25
3.1 INTRODUÇÃO .....	25
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	25
3.2.1 CIMENTO .....	25
3.2.2 FILER CALCÁRIO .....	27
3.2.3 AGREGADO FINO .....	28
3.2.4 SÍLICA DE FUMO .....	29
3.2.5 METACAUPLINO .....	30
3.2.6 SUPERPLASTIFICANTE .....	31

3.2.7 FIBRAS .....	32
<b>3.3 CÁLCULO DA ÁGUA LIVRE PARA PASTAS .....</b>	<b>34</b>
3.3.1 DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO .....	34
3.3.2 CÁLCULO DA ÁGUA LIVRE.....	36
<b>3.4 ESTUDO EM ARGAMASSA SEM FIBRAS .....</b>	<b>42</b>
3.4.1 DEFINIÇÃO DAS COMPOSIÇÕES FINAIS .....	42
3.4.2 AMASSADURA .....	43
3.4.3 CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO FRESCO .....	44
3.4.4 CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO ENDURECIDO .....	46
<b>3.5 ESTUDO EM ARGAMASSA COM FIBRAS.....</b>	<b>50</b>
3.5.1 AMASSADURA .....	50
3.5.2 CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO FRESCO .....	51
3.5.3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE BEDRF COM METACAUINO E COM OUTROS MATERIAIS .....	56
<b>4 Caracterização da composição estudada.....</b>	<b>61</b>
4.1 INTRODUÇÃO .....	61
4.2 PROCEDIMENTO DE AMASSADURA .....	61
4.3 CARACTERIZAÇÃO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	63
4.3.1 RESULTADOS DO ENSAIO DEWS PARA DIFERENTES IDADES SEM ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS.....	64
4.3.2 INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS NOS ENSAIOS DEWS .....	65
4.4 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A MATRIZ ESTUDADA E A COMPOSIÇÃO DE REFERÊNCIA ...	67
4.5 ENSAIOS DE PERMEABILIDADE MAGNÉTICA .....	69
4.5.1 INDUTÂNCIA MAGNÉTICA .....	70
4.5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DA PERMEABILIDADE MAGNÉTICA.....	71
4.5.3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS COM A COMPOSIÇÃO DE REFERÊNCIA..	72
4.6 CORRELAÇÃO ENTRE RESULTADOS DEWS E PERMEABILIDADE MAGNÉTICA .....	73
<b>5 Permeabilidade magnética no BEDRF incorporando metacaulino .....</b>	<b>75</b>
5.1 INTRODUÇÃO .....	75
5.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	75
5.2.1 CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO FRESCO .....	76
5.2.2 PROCESSO DE BETONAGEM DOS PROVETES .....	78
5.3 PERMEABILIDADE MAGNÉTICA .....	79
5.3.1 RESULTADOS DA PERMEABILIDADE MAGNÉTICA PARA CADA PROVETE .....	79
5.3.2 INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO DE PLACAS COM DIFERENTES DOSAGENS DE FIBRAS NO ENSAIO DE PERMEABILIDADE MAGNÉTICA. ....	82

5.3.3 INFLUENCIA DA INTRODUÇÃO DE ARMADURA NA PERMEABILIDADE MAGNÉTICA .....	88
<b>5.4 INFLUÊNCIA DO TIPO DE FIBRAS NA PERMEABILIDADE MAGNÉTICA .....</b>	<b>92</b>
5.4.1 ENSAIO DE PERMEABILIDADE MAGNÉTICA PARA CADA PROVETE .....	93
5.4.2 INFLUÊNCIA DA INTRODUÇÃO DE ARMADURAS NO ENSAIO DE PERMEABILIDADE MAGNÉTICA .....	95
<b>5.5 ANÁLISE COMPARATIVA DE RESULTADOS .....</b>	<b>97</b>
<b>6 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>101</b>
6.1 CONCLUSÕES.....	101
6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	102



## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2. 1 a) Estádio Jean Bouin; b) MUCEM .....	7
Fig.2. 2 Ponte Wild – Brucke.....	7
Fig.2. 3 Ponte Kassel na Alemanha, 2007 .....	8
Fig.2. 4 Reparação e proteção das fundações e pilares do viaduto The Valabres [2] .....	8
Fig.2. 5 Reforço de lajes de pontes rodoviárias com BEDRF.....	9
Fig.2. 6 Aspeto típico do caulino .....	10
Fig.2. 7 Localização geográfica de caulino em Portugal [16] .....	13
Fig.2.8 Diferentes tipos de fibras e micro-fibras [13].....	14
Fig.2.9 Comparação entre uma mistura dum betão convencional e de um betão de elevada resistência com fibras [5].....	15
Fig.2. 10 Exemplo das proporções de uma mistura BEDRF [18] .....	16
Fig.2. 11 Diagramas tensão/extensão em tração de betões HPC, NC e UHPFRC [2] .....	16
Fig.2.12 Resistência à compressão para diferentes razões água/cimento (w/c) [19] .....	17
Fig.2. 13 Representação esquemática da distribuição incorrecta das fibras: a) segregação estática; b) segregação dinâmica [23] .....	18
Fig.2. 14 diferentes tipos de orientação das fibras: a) orientação transversal; b) sem orientação c) Orientação longitudinal das fibras [8] .....	18
Fig.2. 15 Ensaio à tração uniaxiais (b,e,f) e ensaios à tração por flexão (a,c,d) e ensaio DEWST (g) .....	20
Fig.2. 16 Ensaio à tração uniaxial e aspeto de provete no fim do ensaio .....	21
Fig.2. 17 Esquema representativo do ensaio Wedge splitting test [24] .....	22
Fig.2. 18 Comparação entre o ensaio de flexão sob 3 pontos e o ensaio Wedge splitting test [19] ....	22
Fig.2.19 Comparação entre o ensaio Double- Edge wedge splitting test e o ensaio à tração uniaxial [19].....	22
Fig.2.20 Representação de um LVDT à esquerda e uma célula de carga à direita [5] .....	23
Fig.3. 1 Curva granulométrica do CEM 42,5R obtida através da técnica de difracção a laser .....	26
Fig.3. 2 Imagem obtida do microscópio electrónico de varrimento das partículas do cimento utilizado .....	27
Fig.3. 3 Curva granulométrica do filler .....	28
Fig.3. 4 Pormenor das partículas do filler calcário obtidas através do microscópio de varrimento .....	28
Fig.3. 5 Curva granulométrica do agregado fino .....	29
Fig.3. 6 Partículas da sílica de fumo observadas ao microscópio de varrimento .....	29

Fig.3. 7 Partículas do Metacaulino observadas pelo microscópio electrónico. ....	30
Fig.3. 8 Superfície das fibras utilizadas observada ao microscópio de varrimento: a)fibra de 6mm de comprimento;b)fibra de 9mm de comprimento; c)fibra de 12mm de comprimento; d)fibra de 12,5mm de comprimento.....	32
Fig.3. 9 Resistência à tração: a) betão simples com grande quantidade de agregado; b) betão simples sem contacto entre as partículas de agregado; c) betão reforçado com fibras; d) betão reforçado com microfibras. [1].....	34
Fig.3. 10Representação da compactação da pasta depois da centrifugação [27].....	34
Fig.3. 11 Procedimento de amassadura das pastas: a)materiais utilizados; b) aspeto inicial da pasta antes de se iniciar a mistura; c) misturadora; d) aspeto final da pasta.....	36
Fig.3. 12 Procedimento para o cálculo da água livre: a)Introdução da pasta num tubo de ensaio; b) Pesagem do provete antes da centrifugação; c) Provetes no aparelho centrifugador; d) Retirada da água livre com uma pipeta. ....	37
Fig.3. 13 Água livre de cada provete.....	39
Fig.3. 14 Composição das diversas pastas em estudo.....	39
Fig.3. 15 – Representação de diversas composições de finos estudadas no triângulo de Feret .....	41
Fig.3. 16Grau de compactação das misturas de finos estudadas do menos compacto (azul) para o mais compacto (vermelho) .....	41
Fig.3. 17 Representação da composição das argamassas em volume .....	43
Fig.3. 18 Esquema representativo do procedimento de amassadura .....	43
Fig.3. 19 Fases do processo de amassadura: a) Diferentes componentes da mistura; b) introdução dos finos e da areia com a primeira quantidade de água; c) paragem da amassadura para introdução de superplastificante e restante água; d) aspeto final da mistura.....	44
Fig.3. 20 Ensaio de espalhamento: a) enchimento do cone; b) levantamento do cone e espalhamento da argamassa.....	45
Fig.3. 21 Equipamento utilizado para o ensaio do Funil-V .....	46
Fig.3. 22 Molde para provetes 4x4x16cm <sup>3</sup> .....	47
Fig.3. 23Equipamento utilizado para o ensaio à flexão .....	47
Fig.3. 24 Representação esquemática de aplicação de cargas para o ensaio à flexão.....	47
Fig.3. 25 Equipamento utilizado para os ensaios à compressão.....	48
Fig.3. 26 Representação esquemática do procedimento da amassadura da argamassa com fibras..	50
Fig.3. 27 a) aspeto das fibras utilizadas; b) argamassa no momento de introdução das fibras.....	50
Fig.3. 28 Aspeto da argamassa n final do ensaio de espalhamento. ....	51
Fig.3. 29 – Desenho esquemático da aplicação de forças no provete durante o ensaio DEWS [27] ..	53
Fig.3. 30 – Provette preparado para iniciar o ensaio DEWS .....	54
Fig.3. 31 Evolução da fenda ao longo do ensaio DEWS .....	54
Fig.3. 32 – Gráfico que evidencia relação entre a tensão de pico e a dosagem de fibras .....	55

Fig.3. 33 – Gráfico que evidencia relação entre a abertura da fenda e a resistência à tração .....	56
Fig.3. 34 – Gráfico comparativo do decréscimo da trabalhabilidade com o aumento de fibras .....	58
Fig.3. 35 Gráfico representativo dos resultados do ensaio DEWST para a composição com pó-de-vidro.....	58
Fig.3. 36 Gráfico representativo dos resultados do ensaio DEWS para a composição com sílica de fumo.....	59
Fig.4. 1 Esquema do procedimento experimental utilizado na amassadura do betão .....	61
Fig.4. 2 Misturadora zyklos utilizada nas amassaduras do BEDRF .....	62
Fig.4. 3 Processo de amassadura do betão: (a) Conjunto de provetes a serem betonados para ensaios posteriores; (b) Introdução dos finos, agregado, água e sílica de fumo na misturadora; (c) Misturadora em fase de mistura; (d) Processo intermédio de raspagem das pás para que não fique material acumulado; e) Introdução do superplastificante, (f) Aspeto final do betão .....	63
Fig.4. 4 Distribuição mais ou menos uniforme das fibras na espessura da placa .....	64
Fig.4. 5 Gráfico resultante do ensaio DEWS que relaciona a tensão com a abertura da fenda para a composição do metacaulino com 3% de fibras sem orientação .....	64
Fig.4. 6 Gráfico representativo da evolução da resistência à tração com a idade sem orientação das fibras.....	65
Fig.4. 7 Electroímã em “U” .....	65
Fig.4. 8 Representação esquemática do método de orientação por fluxo .....	66
Fig.4. 9 Gráfico representativo dos resultados do ensaio DEWS para provetes com fibras orientadas .....	66
Fig.4. 10 Gráfico representativo do ensaio DEWS para a composição de referência com sílica de fumo.....	67
Fig.4. 11 Gráfico representativo da evolução das tensões de pico com a idade .....	68
Fig.4. 12 Gráfico representativo dos resultados do ensaio DEWS para provetes com as fibras orientadas e composição de referência .....	68
Fig.4. 13 Sonda magnética para medição da permeabilidade.....	70
Fig.4. 14 Representação esquemática dos sentidos de medição adotados. ....	71
Fig.4. 15 Gráfico representativo dos resultados do ensaio de permeabilidade magnética para os provetes com e sem orientação .....	72
Fig.4. 16 Gráfico representativo dos resultados do ensaio de permeabilidade magnética para a composição de referência. ....	73
Fig.4. 17 Correlação entre resultados DEWST e permeabilidade magnética .....	74
Fig.5. 1 Ensaio de espalhamento: a) Enchimento do cone; b) Espalhamento do betão numa superfície lisa .....	76

Fig.5. 2 Resultados do ensaio de espalhamento com: a) 1%; b) 2%; c) 3%; d) 4% de fibras .....	77
Fig.5. 3 Gráfico representativo da evolução do espalhamento do betão com o aumento do fator de forma .....	77
Fig.5. 4 Diferentes componentes do equipamento de orientação magnética das fibras [2] .....	78
Fig.5. 5 Betonagem do provete dentro do equipamento de orientação magnética segundo a direcção de 0° .....	79
Fig.5. 6 Betonagem do provete com as fibras dispostas de forma aleatória .....	79
Fig.5. 7 Medição da permeabilidade magnética em cada placa: a) na zona A1 a 0°; b) na A1 a 90°; c) na zona A2 a 0°; d) na zona A2 a 90° .....	80
Fig.5. 8 Gráfico representativo dos valores obtidos no ensaio de permeabilidade magnética para os provetes com e sem orientação. ....	82
Fig.5. 9 Pontos de medição e diferentes configurações estudadas .....	83
Fig.5. 10 a) Disposição das placas na configuração 1; b) medição a 90° .....	83
Fig.5. 11 Representação dos resultados da permeabilidade magnética a 0° nas várias configurações dos provetes sem orientação segundo uma superfície de cores: a) Configuração 1; b) configuração 2; c) Configuração 3; d) Configuração 4 .....	84
Fig.5. 12 Representação dos resultados da permeabilidade magnética a 90° nas várias configurações dos provetes sem orientação segundo uma superfície de cores: a) Configuração 1; b) Configuração 2; c) configuração 3;d) Configuração 4 .....	85
Fig.5. 13 Representação dos resultados da permeabilidade magnética a 0° nas várias configurações dos provetes cujas fibras estão orientadas a 90° segundo uma superfície de cores: a) Configuração 1; b) Configuração 2 c) Configuração 3; d) Configuração 4 .....	86
Fig.5. 14 Representação dos resultados da permeabilidade magnética a 90° nas várias configurações dos provetes cujas fibras estão orientadas a 0° numa superfície de cores: a) Configuração 1 b) Configuração 2; c) Configuração 3; d) Configuração 4.....	86
Fig.5. 15 Representação gráfica da influência da alteração de configurações no valor da permeabilidade para cada dosagem de fibras diferente .....	87
Fig.5. 16 – Introdução de armadura no ensaio de permeabilidade magnética: a) incorporação de um varão centrado; b) medição a 0° de dois varões espaçados de 10cm .....	88
Fig.5. 17 Representação gráfica da influência da introdução da armadura nos resultados da permeabilidade magnética a 0° em cada uma das zonas dos provetes cujas fibras estão dispostas aleatoriamente.....	89
Fig.5. 18 Representação gráfica da influência da introdução da armadura nos resultados da permeabilidade magnética a 90° em cada uma das zonas dos provetes cujas fibras estão dispostas aleatoriamente.....	90
Fig.5. 19 Representação gráfica da influência da introdução da armadura nos resultados da permeabilidade magnética a 0° em cada uma das zonas dos provetes cujas fibras estão orientadas a 0° também. ....	91



Fig.5. 20 Representação gráfica da influência da introdução da armadura nos resultados da permeabilidade magnética a 90° em cada uma das zonas dos provetes cujas fibras estão orientadas a 0° .....	92
Fig.5. 21 Representação gráfica dos resultados da permeabilidade magnética para os diferentes provetes .....	95
Fig.5. 22 Representação gráfica dos resultados da permeabilidade magnética a 0° para os diferentes tipos de fibras com e sem introdução de armadura .....	96
Fig.5. 23 Representação gráfica dos resultados da permeabilidade magnética a 90° para os diferentes tipos de fibras com e sem introdução de armadura .....	97
Fig.5. 24 Representação gráfica dos resultados da permeabilidade magnética para os diferentes provetes com e sem orientação incorporando todas as fibras estudadas neste capítulo. ....	97
Fig.5. 25 Representação gráfica dos valores médios da permeabilidade magnética a 0°, para uma percentagem de 3% de fibras com introdução de armadura .....	98
Fig.5. 26 Representação gráfica dos valores médios da permeabilidade magnética a 90°, para uma percentagem de 3% de fibras com introdução de armadura .....	98



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1- Principais ensaios para caracterização ao estado fresco e respectiva propriedade testada [9].....	19
Quadro 2 – Características do cimento [5].....	26
Quadro 3 – Características do Filler BETOCARB P1-OU utilizado .....	27
Quadro 4 – Características químicas e físicas do metacaulino .....	31
Quadro 5 – Características do superplastificante Viscorete 20HE .....	32
Quadro 6 Características das fibras fornecidas pela KrampeHarex.....	33
Quadro 7 – Composições das pastas testadas em $\text{kg/m}^3$ .....	35
Quadro 8 – Resultados das densidades volúmicas e água livre de cada provete .....	38
Quadro 9 – Análise comparativa entre composições e água livre.....	40
Quadro 10 – Composições finais a ser utilizados nos estudos das argamassas.....	42
Quadro 11 – Composições em $\text{kg/m}^3$ e em volume das argamassas .....	42
Quadro 12 Resultados do ensaio de espalhamento para as três misturas .....	45
Quadro 13 Resultados do ensaio do Funil-V para as três misturas .....	46
Quadro 14 Resultados da resistência à tração e compressão para todos os provetes de cada mistura .....	49
Quadro 15 Composições da mistura para cada percentagem de fibras.....	52
Quadro 16 Resultados do ensaio de espalhamento, para as três percentagens de fibras ensaiadas .....	52
Quadro 17 – Resultados do ensaio DEWS para os seis provetes .....	55
Quadro 18 Composição incorporando pó-de-vidro .....	57
Quadro 19 Composição de referência incorporando sílica de fumo.....	57
Quadro 20 Resultados das tensões de pico para diferentes composições aos 28 dias .....	69
Quadro 22- Composições utilizadas com diferentes percentagens de fibras ( $\text{Kg/m}^3$ ) .....	76
Quadro 23 Resultados da permeabilidade magnética para os provetes sem orientação das fibras ...	80
Quadro 24 Resultados da permeabilidade magnética para os provetes cujas fibras estão orientadas a $0^\circ$ .....	81
Quadro 25 Resultados do ensaio de espalhamento para as misturas contendo diferentes tipos de fibras.....	93
Quadro 26 Resultados da permeabilidade magnética para os provetes com diferentes tipos de fibras, com a sonda posicionada a $0^\circ$ e $90^\circ$ .....	94



## **SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS**

w/c – Razão água cimento

sp – superplastificante

sp/p – Dosagem de superplastificante relativamente à massa de material fino da mistura

Ft- Resistência à tração (MPa)

Ff – Força aplicada (KN)

l – Comprimento do provete

b – Largura do provete

Fc – Resistência à compressão (MPa)

E – espessura (cm)

Lf – Comprimento das fibras (mm)

Vf – volume de fibras [%]

Df – diâmetro das fibras [mm]

Desp – Espalhamento [mm]

L – Indutância

$\mu_0$  – Permeabilidade magnética do vácuo

$\mu_r$  – Permeabilidade magnética do meio em análise

N – número de espiras

A – area do núcleo envolvido pelas espiras

L1 – Indutância do meio

L2 – Indutância do ar



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ÂMBITO E OBJETIVOS DO TRABALHO

Quando observamos o espaço que nos rodeia, percebemos que cada vez mais estamos envolvidos por um conjunto de construções e que o betão é já um material dominante nas nossas cidades, sendo a sua utilização apenas superada pelo consumo de água.

Esta utilização constante deve-se ao facto de ser produzido por matérias-primas de baixo custo e de fácil acesso e por tornar possível a construção das mais diversas formas estruturais devido à facilidade com que ocupa moldes e cofragens [1].

Apesar de ser o material mais utilizado na construção, apresenta algumas fragilidades no que diz respeito à resistência à tração, ductilidade e durabilidade.

A ambição e necessidade de ultrapassar obstáculos e concretizar desafios é uma qualidade intrínseca ao ser humano. Vivemos tempos em que o impossível é apenas uma questão de tempo e as exigências são cada vez mais elevadas tanto a nível arquitetónico, com formas cada vez mais excêntricas e singulares, como a nível mecânico. Para o engenheiro civil esses obstáculos podem estar concretizados nos próprios limites impostos pelos materiais com que trabalha [1].

O betão de elevado desempenho reforçado com fibras (BEDRF) surge no seguimento dessa necessidade e apresenta-se como uma combinação ótima de rigidez e resistência à compressão e a tração, tendo como concorrente mais próximo o aço estrutural e exibindo simultaneamente maior durabilidade. Pode ser encarado como uma extensão dos betões convencionais reforçados com fibras e dos betões de elevado desempenho, oferecendo também a possibilidade de pertencer à família dos betões auto-compactáveis [2].

O betão reforçado com fibras pode ser aplicado isoladamente ou em combinação com armaduras ordinárias ou de pré-esforço, podendo ser utilizado também como material de reparação e reabilitação.

No entanto, e apesar de todos os benefícios, o seu elevado custo dificulta uma utilização generalizada em estruturas correntes, podendo, no entanto, ser competitivo em estruturas com necessidades específicas [2].

No sentido de melhorar cada vez mais e aumentar o seu uso, têm vindo a ser estudadas novas adições como metacaulino, pó-de-vidro, cinzas volantes, etc. É neste sentido que surge o desenvolvimento desta dissertação.

O presente trabalho integra um projecto de investigação levado a cabo na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto no Laboratório de Tecnologia de Betão e do Comportamento Estrutural (LABEST) e que visa o estudo e desenvolvimento de composições

de BEDRF robustas e eco-eficientes dimensionadas à medida das exigências de desempenho, para demonstrar a aplicabilidade e as vantagens deste material usado em elementos pré-fabricados esbeltos e em aplicações de reparação/reabilitação. [2]

No seguimento deste projecto, o presente trabalho tem como objectivo o estudo da adição do metacaulino, percebendo qual a sua influência em termos mecânicos, variando composições e tipos de fibras.

Sendo o metacaulino um material pozolânico amplamente utilizado nas mais diversas indústrias, pretende-se com este trabalho verificar qual a sua influência a nível mecânico no betão, já que é sabido que a sua introdução diminui significativamente as emissões de CO<sub>2</sub>, sendo um passo importante na sustentabilidade da utilização do betão.

## **1.2. PLANO DE TRABALHOS**

Ao longo desta dissertação tentar-se-á compreender melhor qual a influência da incorporação de metacaulino no betão de elevado desempenho reforçado com fibras no comportamento mecânico deste material.

Neste sentido, será necessário, em primeiro lugar, definir as composições que serão alvo de estudo. Neste sentido iniciar-se-á o trabalho com o cálculo da água livre de várias pastas com composições diferentes, com o objectivo de obter a composição mais compacta possível.

Depois de definidas as composições, será feito o estudo das argamassas, com as percentagens de finos escolhidas, sem fibras. Nesta fase será feito a caracterização do estado fresco de cada composição, bem como do estado endurecido pelos ensaios à flexão e compressão. Daqui será escolhida a composição com melhores resultados, sendo introduzidas percentagens de fibras diferentes sendo feita a caracterização do estado endurecido através do ensaio Double Edge Wedge Splitting (DEWS).

Posteriormente, será realizada uma amassadura com um volume superior, que permitirá a obtenção de provetes para o estudo da influência da orientação das fibras pelo método da orientação magnética e da orientação por fluxo. O estudo da orientação e distribuição das fibras será feito através do método de permeabilidade magnética desenvolvido no âmbito do projecto em que se insere a presente dissertação.

Os resultados obtidos pelos ensaios realizados serão comparados com a composição de referência incorporando sílica de fumo e com uma composição incorporando pó de vidro que está a ser simultaneamente estudada no âmbito deste projecto no sentido de perceber as vantagens e desvantagens da introdução do metacaulino.

Por fim, no sentido de compreender mais aprofundadamente o método da orientação da permeabilidade magnética será estudada a utilização de diferentes tipos de fibras com diferentes dosagens, com e sem orientação, bem como a influencia da introdução da armadura nos resultados do ensaio.

## **1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

A presente dissertação está dividida em seis capítulos incluindo o presente que esclarece o âmbito e objectivos do trabalho fazendo referência ao conteúdo dos restantes capítulos.

O segundo capítulo enquadra o trabalho, referindo outros estudos anteriores no mesmo âmbito, explicando conceitos básicos e mostrando o ponto de partida para o presente trabalho, apresentando uma revisão bibliográfica sobre o betão de elevado desempenho reforçado com fibras e o metacaulino.



No terceiro capítulo dá-se início à descrição dos trabalhos experimentais, explicando como se chegou à composição mais adequada e apresentando os resultados dos ensaios à tração efectuados para amassaduras pequenas para misturas com e sem fibras, utilizando diferentes dosagens das mesmas.

No quarto capítulo parte-se para o estudo de uma amassadura maior da composição que apresentou resultados mais benéficos no capítulo anterior, estudando agora, para além da resistência à tração, a influência da orientação das fibras. Este capítulo exprime também os resultados da permeabilidade magnética, que nos elucida sobre a distribuição e qualidade de orientação das fibras na mistura.

No quinto capítulo é feito o estudo da composição com diferentes tipos de fibras, analisando o efeito desta alteração na permeabilidade magnética.

O sexto capítulo é o último desta dissertação e podem aí encontrar-se as conclusões do trabalho bem como aspectos que podem ser alvo de desenvolvimentos futuros.



## 2

### **Betão de Elevado Desempenho Reforçado com fibras**

#### **2.1 INTRODUÇÃO**

Desde muito cedo na história do homem que a utilização dos materiais com propriedades cimentícias toma um papel de importante relevo na construção [3]. É neste âmbito, e com a consciência desta relevância, que ao longo dos anos se têm vindo a estudar materiais que contribuam para um menor impacto ambiental, melhoria das propriedades mecânicas e resistência às agressões do meio.

O betão é o material de construção mais utilizado no mundo, sendo a sua utilização apenas superada pela água. Seis milhões de toneladas são produzidas todos os anos [4]. Nessa perspectiva é de enorme interesse desenvolver novas variantes e melhorar a qualidade deste material, tornando-o mais durável, e resistente. É no seguimento desta necessidade que surge o betão de elevada resistência reforçado com fibras (“High performance fibre reinforced concrete”). Este é um material que resulta da investigação e do conhecimento desenvolvidos no âmbito dos materiais compósitos à base de cimento reforçado com fibras, ao longo dos últimos anos [3].

Embora a investigação e o desenvolvimento do betão com fibras decorra já há mais de quarenta anos, a sua aplicação na maioria dos países europeus é bastante limitada e a sua produção representa uma pequena percentagem do total da produção de betão [5].

Este material pode substituir completamente o betão armado em estruturas de betão como lajes apoiadas no solo, fundações, paredes e revestimento de túneis. Já em estruturas em que se exige capacidade de carga significativa, o BEDRF pode ser usado em combinação com a armadura convencional, diminuindo assim a quantidade de armaduras convencionais ou de pré-esforço [6].

Contudo, e apesar deste material ser uma alternativa capaz de resolver os principais problemas e limitações do betão convencional, surgem ainda novas questões relacionadas com a durabilidade e afectação do meio ambiente, bem como a contínua exigência de propriedades mecânicas cada vez mais melhoradas.

É neste sentido que se desenvolvem novos ligantes provindos da calcinação do caulino, que surgem como passo importante para colmatar estas limitações.

Prevê-se que num futuro próximo, a produção de cimento Portland terá de ser limitada, sendo que as necessidades serão satisfeitas através da introdução de adições como cinzas volantes, sílica de fumo e metacaulino, sendo assim de enorme relevância o estudo do betão de elevado

desempenho reforçado com fibras com a introdução destas adições, mais especificamente do metacaulino.

## 2.2 BETÃO DE ELEVADO DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS

As últimas décadas marcam o desenvolvimento de betão reforçado com fibras originando a expansão das suas aplicações e introdução no mercado mundial. Este sucesso deve-se aos avanços significativos na matriz cimentícia, na qualidade das fibras, e na interação entre as fibras e a matriz, aprofundando-se o conhecimento sobre as propriedades mecânicas do material e fomentando a melhoria da relação desempenho-custo [7].

O betão de elevado desempenho reforçado com fibras é um material cimentício que pode ser encarado como uma extensão de betões convencionais reforçados com fibras e dos betões de elevado desempenho, podendo oferecer também a vantagem de serem auto-compactáveis [8].

Este é um material de elevada resistência à tração, uma vez que a introdução de fibras promove a absorção das tensões após a fissuração, e cuja resistência à compressão ultrapassa sistematicamente os 150MPa. Pode permitir, dependendo do comportamento estrutural e da solicitação, a dispensa de armaduras convencionais. Embora o seu peso específico seja semelhante ao do betão convencional ( $2500\text{Kg/m}^3$ ), este pode ser usado em elementos mais esbeltos [1].

Este material pode ser caracterizado por algumas particularidades que o distinguem e que fazem dele uma alternativa capaz de resolver os problemas do betão convencional como a elevada resistência mecânica, o comportamento dúctil potenciado pela inclusão de fibras, a baixa relação água-cimento, a grande densidade de empacotamento, notória resistência à penetração de agentes agressivos e grande durabilidade.

Devido à sua elevada resistência mecânica e elevada durabilidade, o BEDRF é então uma opção que permite produzir estruturas mais esbeltas com menor consumo de matéria-prima. O facto de a mistura escoar sob acção do peso próprio, dado a sua propriedade auto-compactável, permite uma distribuição homogénea das fibras, melhorando a qualidade da estrutura final. Existe, assim, a convicção de que esta solução pode ser uma forma da Engenharia Civil contribuir para um futuro sustentável [4].

### 2.2.1 APLICAÇÕES DO BEDRF

Devido ao custo elevado da sua produção relativamente ao betão convencional, o BEDRF pode não ser utilizado em toda a estrutura sendo bastante utilizá-lo apenas nos locais onde as suas propriedades de resistência mecânica e durabilidade são mais necessárias [5]. O mercado de peças pré-fabricadas apresenta-se como um alvo para a produção do BEDRF. Este material tem tido diversas aplicações em todo mundo, nomeadamente, em pontes pedonais e rodoviárias, coberturas, etc. O seu desenvolvimento e aperfeiçoamento possibilitou a construção de projectos arquitectónicos que até então só poderiam ser realizados com recurso ao aço.

A sua utilização ao nível da reabilitação de estruturas pode ser também uma mais-valia, por exemplo ao nível de pilares onde é utilizado como uma camada de substituição nas zonas mais deterioradas.

De seguida apresentam-se um conjunto de exemplos da sua aplicabilidade:

- Duas grandes obras arquitectónicas em França recentemente inauguradas são o estádio Jean Bouin – Fig.2.1a) e no MUCEM, museu das comunidades em Marselha – Fig.2.1.b)



Fig.2. 1 a) Estádio Jean Bouin; b) MUCEM

- A ponte Wild-Brucke, na Áustria, foi construída em 2010. Trata-se de uma ponte em arco constituída por elementos pré- fabricados de BEDRF



Fig.2. 2 Ponte Wild – Brucke

- Na Alemanha a primeira aplicação deste material foi em 2007 com a construção da ponte Kassel – Fig.2.3. Trata-se de uma ponte treliçada em aço combinada com vigas e lajes pré-fabricadas e pré-esforçadas de BEDRF [7].



Fig.2. 3 Ponte Kassel na Alemanha, 2007

- Este material pode também ser utilizado na reparação de estruturas sujeitas a correntes como por exemplo em pilares e fundações de pontes. Depois de retirado o material degradado é betonada uma camada fina de BEDRF. Na figura 2.4 pode ver-se o modo como foi utilizado este material no viaduto de The Valabres [2].



Fig.2. 4 Reparação e proteção das fundações e pilares do viaduto The Valabres [2]

- Uma das grandes aplicações do BEDRF é no reforço de lajes de pontes rodoviárias, sendo que na figura 2.5 é possível observar o modo como é empregue este material.



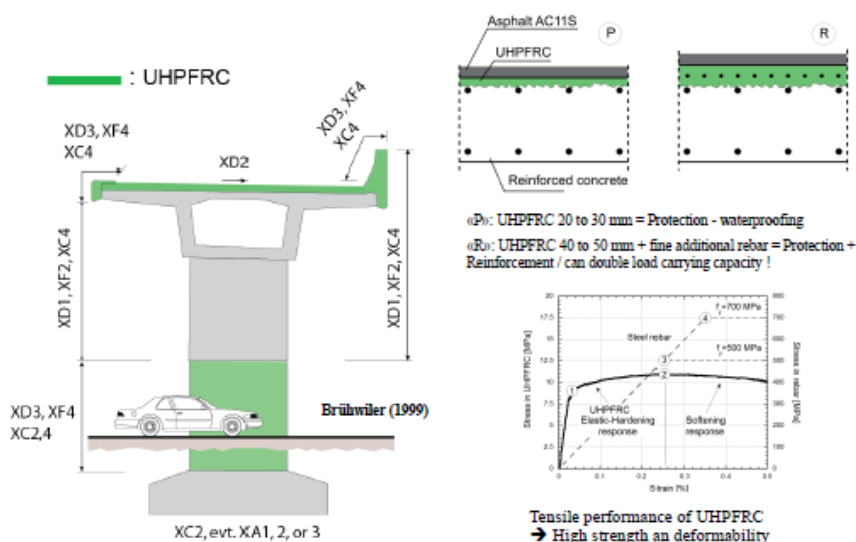


Fig.2. 5 Reforço de lajes de pontes rodoviárias com BEDRF

### 2.3 BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL

Como já foi referido, o betão de elevada desempenho reforçado com fibras é um conjunto de três materiais: betão reforçado com fibras, betão de elevada desempenho e betão auto-compactável.

O betão auto-compactável surge devido à procura contínua no sector da construção civil em eliminar a dependência e, conseqüentemente, os defeitos introduzidos pela acção humana nas construções em betão [9].

O BAC deve ser capaz de escoar no interior dos moldes depositando-se de forma natural, sem recurso à vibração, sob acção do peso próprio preenchendo os espaços de ar sem que ocorra segregação.

Para que seja fiável, este material deve respeitar um conjunto de exigências:

- Capacidade de enchimento – propriedade que determina a velocidade a que o BAC escoar quando sujeito ao peso próprio e preenche os espaços no interior dos moldes.
- Resistência ao bloqueio – capacidade do betão passar pelo congestionamento das armaduras, proporcionando uma perfeita aderência com as mesmas, sem aplicação de energia externa;
- Resistência à segregação – capacidade do BAC se manter homogêneo, resistindo à segregação e à formação de bolhas de ar, durante o transporte, colocação e cura do betão [9].

As misturas auto-compactáveis permitem obter uma melhor distribuição das fibras. De facto, o BEDRF em conjunto com o betão auto-compactável (BAC) oferece enormes possibilidades na mecanização e industrialização dos processos de construção, que para além de reduzir o número de operários, permite aumentar a qualidade final do produto [1].

### 2.4 UTILIZAÇÃO DO METACAUPLINO NO BEDRF

#### 2.4.1 HISTÓRIA, PRODUÇÃO E COMPOSIÇÃO DO METACAUPLINO

O nome Caulino deriva do termo chinês “Kao-ling”, nome dado a uma colina perto de Jauchau Fu, onde este material foi minado há séculos atrás para cerâmica [10].

Na Fig. 2.5 pode ver-se o aspeto típico do caulino.



Fig.2. 6 Aspeto típico do caulino

Actualmente o caulino é um dos minerais industriais mais utilizados no mundo, sendo que a sua produção total excede os 25 milhões de toneladas.

Este é uma matéria- prima extremamente útil devido às suas características como a cor branca, suavidade, partículas de pequena dimensão e inércia química, que o faz ser utilizado em diferentes aplicações industriais.

Algumas das suas aplicações são as seguintes [10]:

- Produção de cimento, cerâmica, porcelana e tijolo;
- Tintas, borracha e plástico;
- Matéria-prima para revestimentos e materiais anti-fogo;
- Produtos químicos, medicinais e cosméticos;
- Têxteis
- Petróleo
- Indústria de papel

O metacaulino é um material pozolânico, cuja primeira utilização no betão remonta ao ano de 1962 no Brasil [11].

Originalmente o termo pozolana estava associado a cinzas volantes formadas naturalmente e materiais calcinados que reagem com a cal à temperatura ambiente na presença de água. Contudo, recentemente, o termo foi estendido aos materiais “silicoso/aluminosos” que, quando finamente moídos e na presença de água, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio formando compostos com propriedades cimentícias [12].

O metacaulino é obtido por desidroxilação quase total de caulinos, processo em que se verifica uma substancial perda de água de constituição com a correspondente alteração da coordenação do alumínio com o oxigénio. A composição deste material inclui, tipicamente, 50-55% de  $\text{SiO}_2$  e 40-4% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , bem como outros óxidos com quantidades mais reduzidas como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  e  $\text{MgO}$ . [10]

Como já foi dito, o caulino, depois de sofrer um tratamento adequado, é o principal recurso para obtenção do metacaulino.

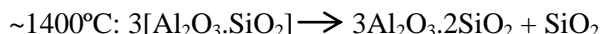
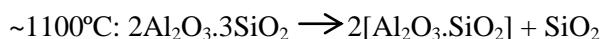
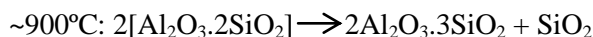
Quando exposto à temperatura ambiente, o caulino é quimicamente estável, porém, quando aquecido a temperaturas desde os 650-900°C, perde cerca de 14% desidróxido. Este tratamento, designado de calcinação, quebra a estrutura do caulino [10]. Como resultado desta



desidroxilação surge, então, o metacaulino, sendo este um material amorfo com reactividade pozolânica e hidráulica, adequado para utilização em materiais cimentícios [6].

As propriedades pozolânicas dependem da abundância de minerais d argila na matéria-prima e das condições de calcinação.

Para diferentes temperaturas de calcinação, os resultados são diferentes [10]:



#### 2.4.2 INTRODUÇÃO DO METACAULINO NO BETÃO

Como já foi referido anteriormente o betão é o material de construção mais usado no mundo devido à sua versatilidade, disponibilidade [13] e custo relativamente baixo [3]. Contudo, surgem problemas ambientais causados pela extracção de matéria-prima e emissão de  $\text{CO}_2$ , aquando da produção do cimento. Outro grande problema relaciona-se com o aumento do número de casos em que estruturas de betão apresentam sérios problemas de deterioração. No sentido de atenuar estes problemas, as misturas de cimento Portland e pozolanas são bastante comuns. A introdução de pozolanas resulta numa adição de vantagens técnicas, manifestadas em reduções de temperatura e melhoria da durabilidade, bem como aumento da resistência, principalmente à compressão [3, 14].

Estes materiais, como a sílica de fumo, cinzas volantes e metacaulino, reagem com os produtos de hidratação do cimento Portland formando um produto secundário – gel C-S-H.

A introdução de metacaulino nesta mistura tem vindo a ser estudada, uma vez que se constatou que as composições contendo metacaulino de elevada reatividade têm um desempenho comparável à de outras adições. Para além disso, a redução de cimento Portland na fabricação do betão é uma mais-valia ambiental, uma vez que, se reduzem as emissões de  $\text{CO}_2$ . Na produção de metacaulino, as emissões gasosas de  $\text{CO}_2$  são muito reduzidas, pois, basicamente no processo há libertação de água [6].

Brooks et al. mostraram que, como a sílica de fumo e as cinzas volantes, também o metacaulino retarda o tempo de início de presa no betão de elevada resistência. Contudo, com o metacaulino, este atraso só se verifica para uma substituição acima dos 10%. [29]

Wild et al. mostraram que aumentando a superfície específica do metacaulino, verifica-se o aumento de resistência nos primeiros dias, sendo que a longo prazo (90 dias) esse aumento não é tão significativo [11].

Caldorone et al produziram betões com 5% e 10% de metacaulino que obtiveram resistências superiores a outros contendo as mesmas quantidades de sílica de fumo [13].

Segundo Siddique e Klaus, o uso de metacaulino em substituição do cimento Portland traz algumas vantagens para o desenvolvimento de betões e argamassas, nomeadamente [4]:

- Aumento da resistência à compressão e flexão;
- Redução da permeabilidade;

- Aumento da resistência a ataques químicos;
- Maior durabilidade;
- Aumento da densidade do betão;
- Redução do potencial de eflorescências;
- Melhor aparência e cor do betão

Sabe-se que o ataque de sulfatos é uma das causas de deterioração de estruturas de betão, levando a expansões e aparecimento de fendas. Para além das vantagens evidenciadas acima, Al-Akhras, mostrou que o uso de metacaulino aumenta consideravelmente a resistência a este tipo de ataque, sendo tanto maior quanto maior for a quantidade de metacaulino [15].

As adições como sílica de fumo, cinzas volantes e metacaulino são formas relativamente simples de promover o aumento de resistência e durabilidade. Estas, juntamente com o uso de fibras, fazem com que este betão tenha um melhor desempenho do que o betão normal.

#### 2.4.3 METACAUFINO EM PORTUGAL

Tendo em conta que a qualidade do produto final está intimamente ligada com a qualidade da matéria-prima utilizada, tem alguma relevância conhecer as características dos materiais existentes em Portugal.

Uma vez que a ideia da introdução do metacaulino nos betões de elevado desempenho reforçados com fibras tem vindo a ganhar espaço no que se refere a estudos feitos a nível mundial, como de resto já foi apresentado atrás, têm vindo a ser feitos estudos em Portugal, nomeadamente na Universidade de Aveiro, sobre a qualidade da matéria-prima nacional [16].

Os depósitos de caulino em Portugal compreendem uma faixa muito limitada que vai de Viana do Castelo a Peniche. Existem alguns que se encontram a ser explorados neste momento, nomeadamente os pontos que se podem ver na Fig.2.6.



Fig.2. 7 Localização geográfica de caulino em Portugal [16]

Segundo este trabalho levado a cabo pela Universidade de Aveiro, no âmbito de uma dissertação do Mestrado em Engenharia Civil, estima-se que a utilização de metacaulino português não comercializado, introduz vantagens significativas no que respeita à resistência à compressão, para idades entre os 28 e 90 dias, sendo superiores até aos valores obtidos com o metacaulino comercializado actualmente.

Desta forma, e estando ainda o metacaulino nacional numa fase de estudo, não sendo comercializado, prevê-se que seja viável a sua utilização futura no fabrico de ligantes [16].

## 2.5 COMPOSIÇÃO TÍPICA

A composição típica de um BEDRF contém normalmente cimento, sílica de fumo, areia fina e filer calcário, sendo que a esta mistura é adicionado o superplastificante (SPL) que permite obter uma elevada densidade de empacotamento [1].

O desenvolvimento dos superplastificantes é fortemente influenciado pelas necessidades. Por um lado o interesse crescente da durabilidade e, por outro lado, os empreiteiros que procuram um betão fácil de manusear, economizando tempo e recursos. Ao nível do BEDRF, o uso do

superplastificante ganha uma importância acrescida devido à reduzida quantidade de água que se utiliza. Assim, as principais características e vantagens da utilização do superplastificante são [17]:

- Permitem uma redução significativa de água;
- Maior fluidez;
- Maior trabalhabilidade e controlo do tempo de início de presa

No âmbito do presente trabalho a sílica de fumo será substituída pelo metacaulino reforçando a matriz com fibras de aço com comprimentos variáveis e cujo volume pode chegar aos 10%. A presença de fibras nas composições de betão influencia muito a resposta do material quando submetido a esforços de tração. A introdução das fibras no betão afeta significativamente a sua trabalhabilidade aumentando, no entanto, a ductilidade do material.

Devido à vasta gama de fibras disponíveis no mercado, faz-se, de seguida, referência aos principais tipos e diferenças entre elas:

- Quanto ao material, as fibras podem ser orgânicas (celulose, bambu, crina d cavalo, etc);
- Quanto às propriedades físico-químicas, as fibras são distinguidas pela sua densidade, rugosidade superficial, estabilidade química, reatividade com a matriz cimentícia, resistência ao fogo, etc.
- Por ultimo, as fibras podem ter diferentes propriedades mecânicas como a resistência à tração, modulo de elasticidade, rigidez, ductilidade, aderência, etc. [1]

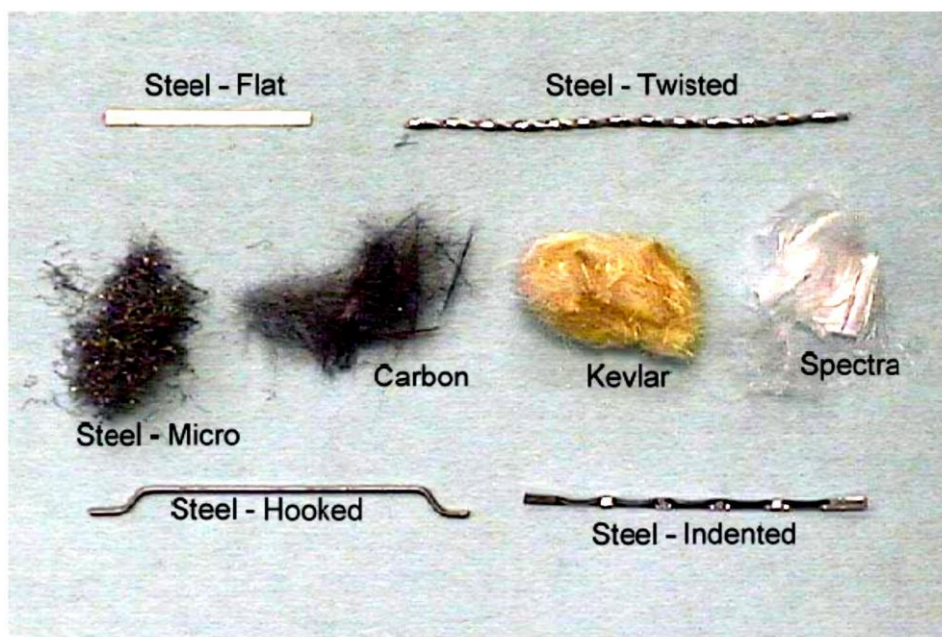


Fig.2.8 Diferentes tipos de fibras e micro-fibras [13]

O betão de elevado desempenho reforçado com fibras caracteriza-se essencialmente por uma baixa relação água/cimento, sendo toda a água utilizada na hidratação total ou de parte do cimento. Verifica-se uma grande homogeneidade devido à ausência de agregado grosso como se confirma na imagem seguinte. A compacidade deste material é também muito elevada já que são usados materiais de tamanhos distintos que se complementam, reduzindo a porosidade [2].

Na Fig.2.8 é possível comparar a mistura de um betão de elevada resistência com fibras e um betão convencional.

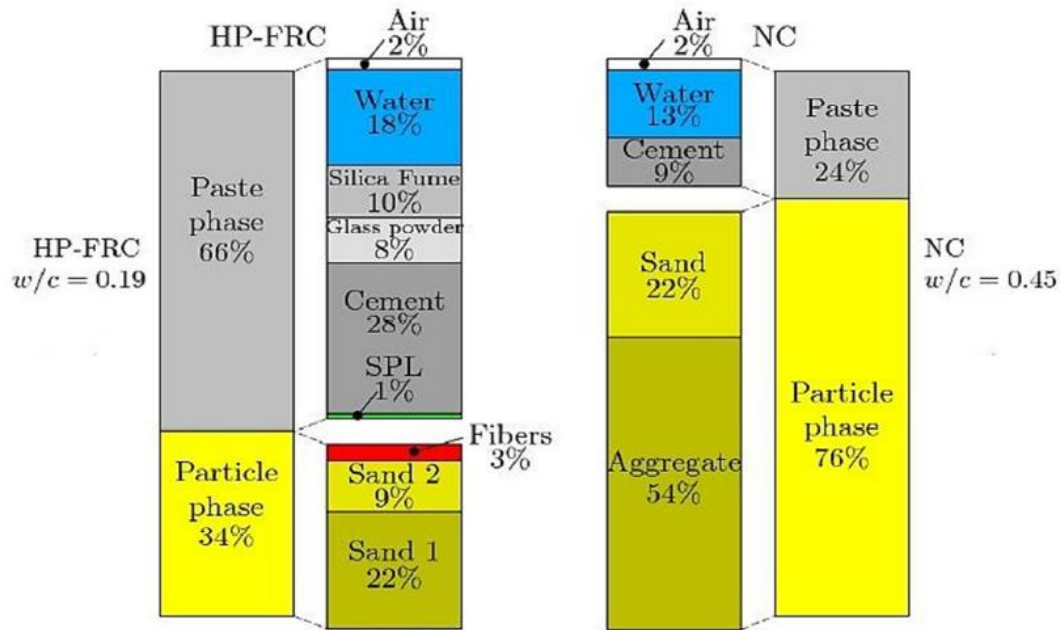


Fig.2.9 Comparação entre uma mistura dum betão convencional e de um betão de elevada resistência com fibras [5]

Como já tinha sido referido, elimina-se o agregado grosso no BEDRF, facilitando desta forma a obtenção de melhores propriedades de resistência e durabilidade. Pierre et al. [2] afirma que para obtenção de uma matriz com grande resistência à compressão é necessário aumentar a homogeneidade da matriz eliminando os agregados grossos.

Conclui-se também que o volume de pasta na composição de BEDRF é cerca 2,5 vezes maior do que aquele que se encontra num betão convencional e verifica-se um aumento de 0,19 para 0,45 da razão água/cimento quando transitamos de um BEDRF para um betão convencional [1, 2].

Estudos realizados por Jung Park et al. [18] concluíram que uma composição típica de BEDRF representada na Fig.2.8 adquire uma resistência à compressão de cerca de 180MPa. Comparando os três tipos de betão: betão convencional (NC), betão de elevado desempenho (HPC) e betão de elevado desempenho reforçado com fibras (UHPFRC), verifica-se, como se pode observar na Fig.2.11, que o BEDRF apresenta um melhor desempenho à tração relativamente aos demais.

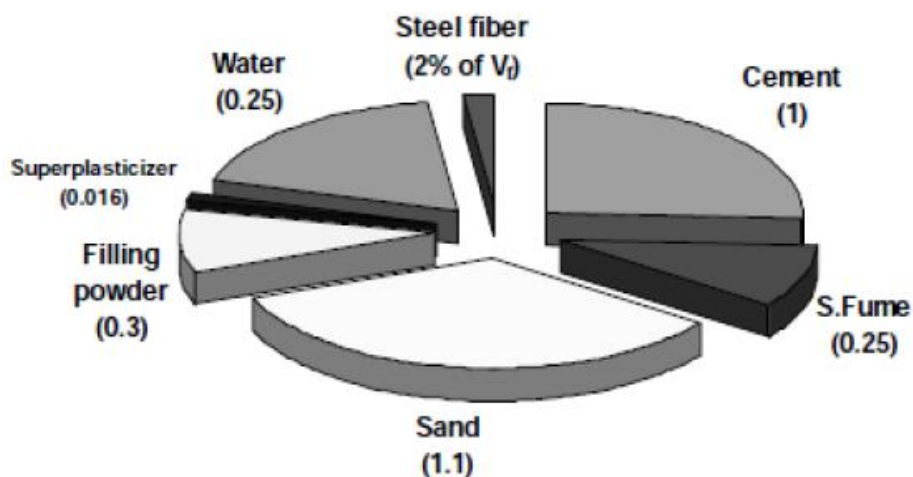


Fig.2. 10 Exemplo das proporções de uma mistura BEDRF [18]

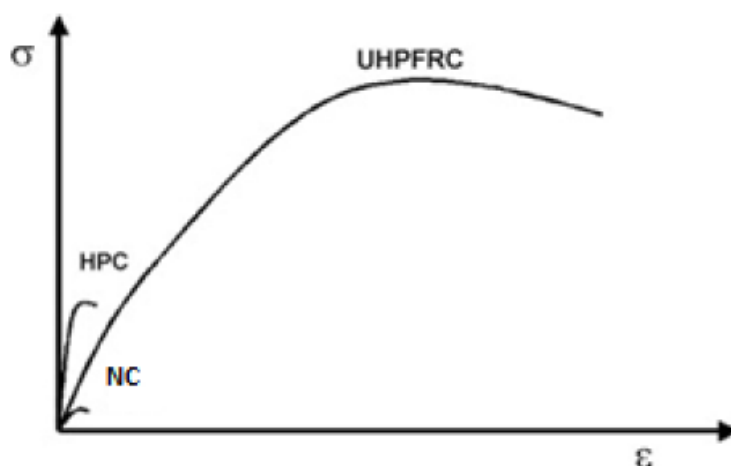


Fig.2. 11 Diagramas tensão/extensão em tração de betões HPC, NC e UHPFRC [2]

Como foi já referido anteriormente, a razão água/cimento é um fator determinante para a resistência, uma vez que quanto menor for esta relação, maior será a resistência. A quantidade de água poderá ser reduzida até à necessária para que se desenvolvam as reações químicas de hidratação do cimento. A Fig. 2.11 pretende esquematizar o estudo levado a cabo por Sobolev [39] que relaciona a resistência à compressão e a razão água/cimento para um betão de elevado desempenho.

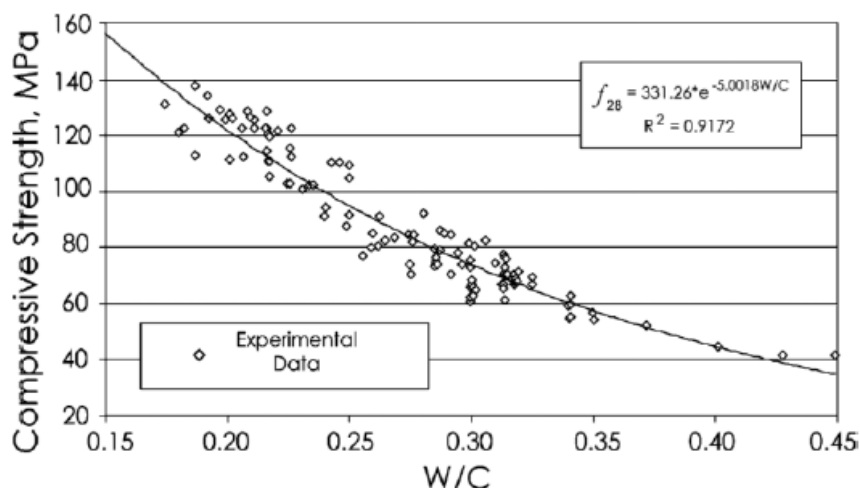


Fig.2.12 Resistência à compressão para diferentes razões água/cimento (w/c) [19]

Não só as propriedades de endurecimento do betão, como também o seu comportamento no estado fresco, podem ser controladas a partir da escolha adequada de adições. [2] Neste sentido existem diversos materiais que podem ser utilizados na substituição de parte do cimento como já foi visto anteriormente, são eles:

- Adições quase inertes- filer calcário;
- Adições hidráulicas latentes – Escórias de alto forno;
- Adições com propriedades pozolânicas – cinza volante, sílica de fumo e metacaulino.

É frequentemente utilizada a sílica de fumo, no entanto, no presente trabalho, estudar-se-á a influência da utilização do metacaulino na composição. Estes materiais, em geral possuem uma elevada superfície específica, o que provoca uma diminuição da distância entre partículas, provocando o contacto entre elas e reduzindo a permeabilidade do betão tornando a estrutura mais densa e homogênea. No caso do filer calcário, a sua função é exclusivamente tornar a mistura mais compacta sendo que para o caso das adições pozolânicas pretende-se contribuir para um aumento da resistência.

#### 2.5.1 INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DAS FIBRAS

Não é só a influência do tipo e quantidade de fibras no comportamento no betão que têm vindo a ser estudados. Têm-se desenvolvido trabalhos no sentido de perceber também qual a acção que a orientação das fibras tem no comportamento mecânico principalmente à flexão [21].

As maiores vantagens da introdução das fibras são a melhoria da resistência à tração e ductilidade. Para além disso, melhoram a tensão tangencial, resistência a cargas dinâmicas e reduzem a abertura de fendas. Estas características podem ser controladas dependendo da percentagem de fibras adicionadas, bem como do tipo de fibras. Segundo Su Tae Kang et al. E Bang Yeon Lee et al. [31], estes efeitos benéficos das fibras de aço podem ainda ser aperfeiçoados pelo alinhamento e distribuição corretos das fibras na matriz.

Um dos pontos mais importantes na utilização do BEDRF é obter uma boa distribuição das fibras. Estas tendem, dependendo do tipo de fibras e da matriz, a ter uma maior densidade quando comparada com o betão fresco, pelo que pode ocorrer segregação. Esta pode acontecer aquando da betonagem – segregação dinâmica, ou depois desta- segregação estática. Uma imagem elucidativa deste fenómeno é apresentada na Fig.2.12:

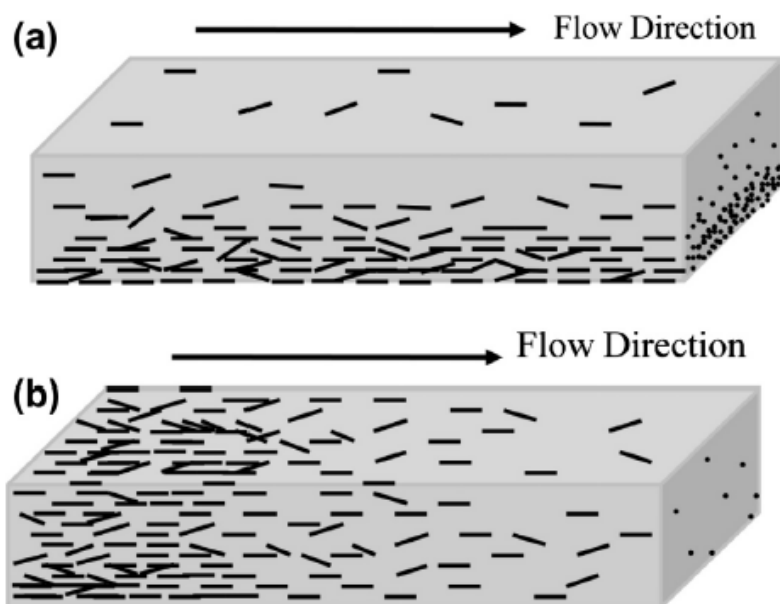


Fig.2. 13 Representação esquemática da distribuição incorrecta das fibras: a) segregação estática; b) segregação dinâmica [23]

Este fenómeno relaciona-se com a viscosidade e fluidez da mistura, bem como com o peso próprio das fibras [23]. Por esta razão é imperativo um bom estudo da composição para que esta possua as características no estado fresco adequadas à introdução das fibras.

Para além da distribuição, também a influência da orientação das fibras tem sido alvo de estudo. Esta pode ser longitudinal, transversal ou aleatória como se vê na Fig.2.13:

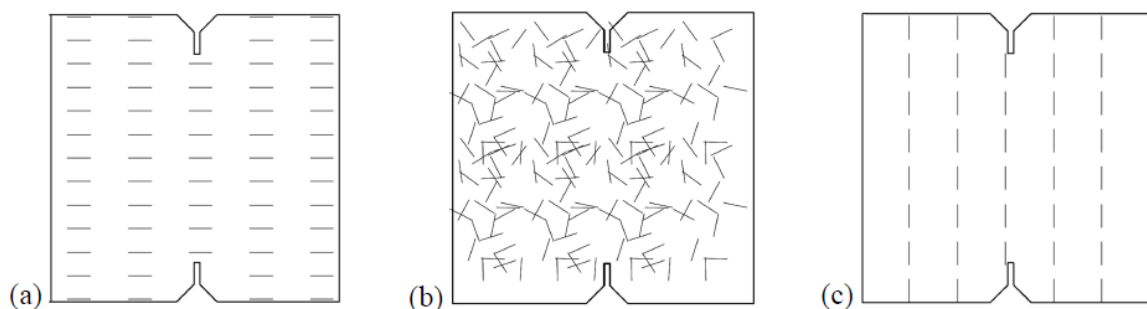


Fig.2. 14 diferentes tipos de orientação das fibras: a) orientação transversal; b) sem orientação c) Orientação longitudinal das fibras [8]

Estudos anteriores revelam que as capacidades resistentes do material podem ser altamente beneficiadas pela orientação das fibras na direcção perpendicular à carga aplicada, pelo que também será averiguado este efeito numa mistura com metacaulino ao longo dos próximos capítulos.

## 2.6 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Um dos requisitos do BEDRF em estudo, é a sua capacidade auto-compactável. Como também já foi supracitado, este tipo de betão compreende algumas características que são fortemente influenciadas pela introdução de fibras. Posto isto, é indispensável verificar a trabalhabilidade do betão no estado fresco [9].



Existem vários tipos de ensaios que se utilizam frequentemente para a verificação destas características, sendo que os mais utilizados são aqueles que se encontram no Quadro 1 com a respectiva propriedade avaliada.

Quadro 1- Principais ensaios para caracterização ao estado fresco e respectiva propriedade testada [9]

Propriedades	Métodos de ensaio preferencial	Norma
Capacidade de enchimento	Diâmetro de espalhamento	EN 12350 8
Viscosidade	T <sub>500</sub> , diâmetro de espalhamento; funil V	EN12350 8
		EN 12350 9
Capacidade de passagem/resistência ao bloqueio	Caixa L	EN 12350 10
Segregação	Ensaio de resistência à segregação	EN 12350 11
		EN 12350 12

No âmbito do presente trabalho são utilizadas versões reduzidas dos ensaios do espalhamento e do funil-V. Os ensaios de dimensões regulares não fariam sentido dada a ausência de agregado grosso. Desta forma, também o ensaio da caixa L e da segregação não se aplicam, já que, como as partículas têm todas dimensões reduzidas, não apresentam resistência à passagem nem segregação.

## 2.7 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Para determinar a resistência à tração do betão podem ser utilizados diversos métodos de ensaio. São exemplos o Wedge Splitting Test (WST), o ensaio de flexão de 3 e 4 pontos, os ensaios de tração uniaxiais e o Double Edge Wedge Splitting Test (DEWST), que foi utilizado neste trabalho em específico. Desses ensaios podemos distinguir os métodos directos e os métodos indirectos [1].

Os métodos directos são ensaios de tração uniaxiais que permitem uma interpretação directa dos resultados, fornecendo directamente diagramas tensão-abertura de fenda ou tensão-extensão. Os métodos indirectos como o Wedge Splitting Test ou o ensaio de flexão de 3 e 4 pontos permitem a obtenção da lei-constitutiva do material sem recurso a equipamentos sofisticados. Uma contrapartida destes ensaios é o facto de não permitirem a obtenção directa de diagramas tensão-extensão, sendo por isso necessário recorrer a métodos de análise inversos complexos que permitam a transformação dos resultados nos diagramas pretendidos. Na Fig.2.1 estão esquematizados os diferentes ensaios que têm vindo a ser utilizados para caracterizar os betões reforçados com fibras. [5]

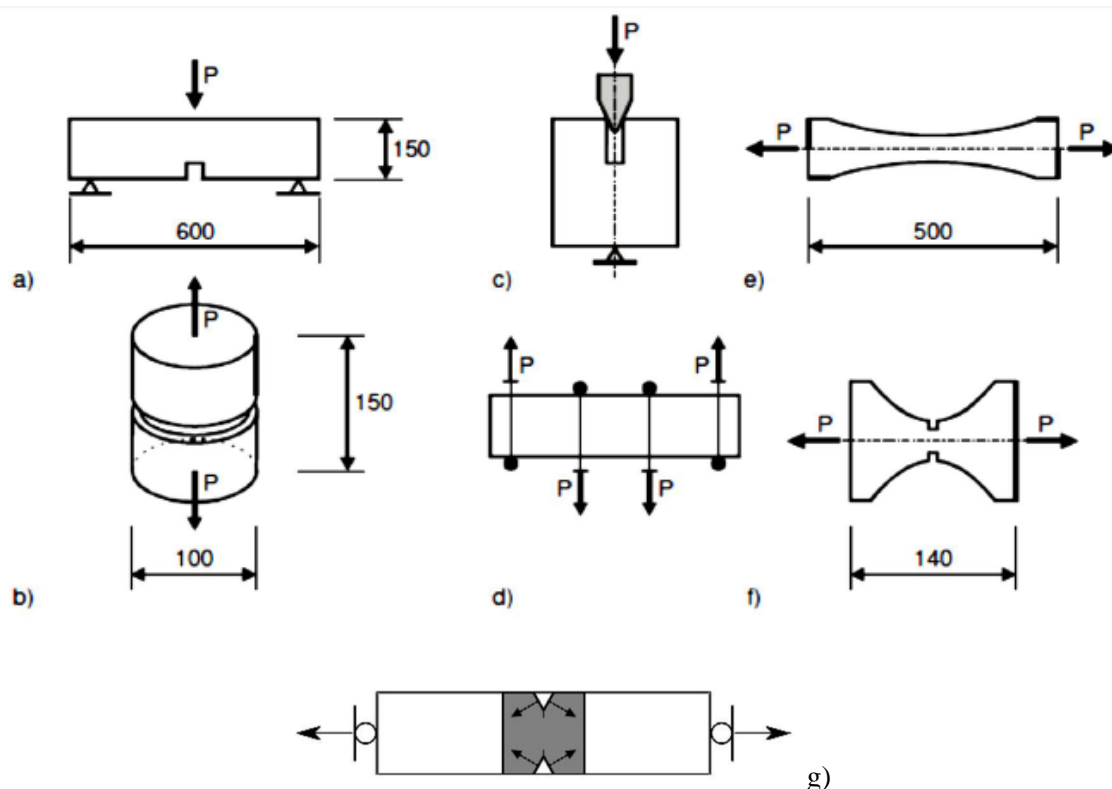


Fig.2. 15 Ensaios à tração uniaxiais (b,e,f) e ensaios à tração por flexão (a,c,d) e ensaio DEWST (g)

Como se pode observar na Fig.2.14, em alguns casos os provetes possuem entalhe e noutros casos não. Alguns autores defendem que os provetes sem entalhe são mais realistas, uma vez que estruturas reais não possuem entalhe. Este é feito para pré-definir o local onde irá surgir a fenda, permitindo medir a abertura da mesma. O diagrama obtido a partir destes provetes relaciona a tensão com a abertura da fenda. Os provetes sem entalhe, normalmente, relacionam a tensão com a extensão do material.

Pode acontecer que, para uma mesma composição, a relação carga e abertura de fenda seja diferente, dependendo do método de ensaio utilizado, pelo que se torna importante o desenvolvimento de ensaios normalizados que conduzam a resultados comparáveis entre diferentes trabalhos [5].

#### 2.7.1 ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL

O ensaio de tração uniaxial é um ensaio de análise direta que permite obter o diagrama tensão-extensão. Pode ser elaborado de forma rápida e foi desenvolvido com o objectivo de ser um ensaio padrão, que ultrapassasse problemas característicos de outros provetes. O ensaio segue um conjunto de princípios [5]:

- É aplicável a provetes moldados, como a carotes;
- É um ensaio relativamente rápido, podendo ser realizados pelo menos 6 ensaios em 4 horas [5]

Na Fig.2.16 pretende mostrar-se a realização do ensaio, bem como o resultado final dum provete

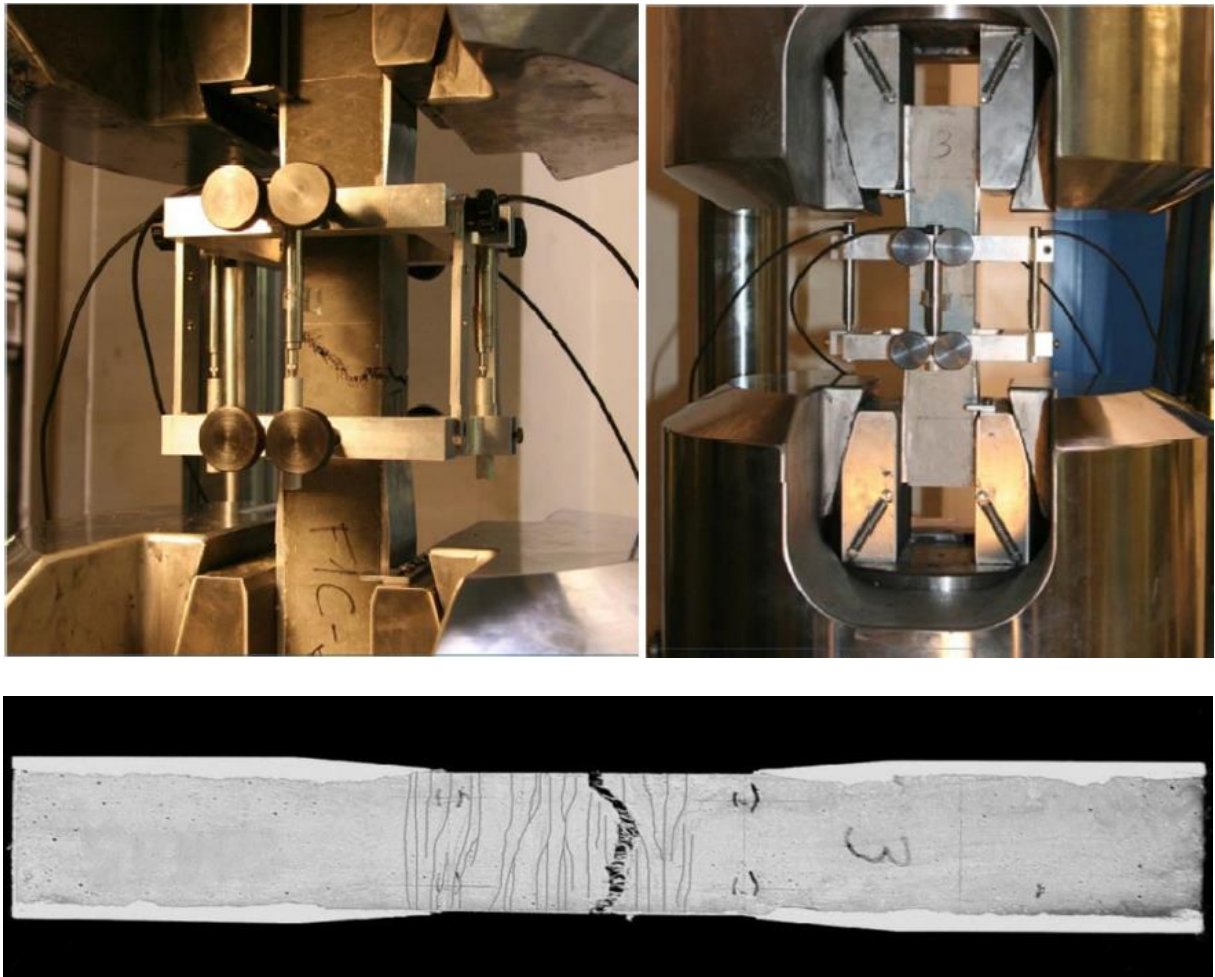


Fig.2. 16 Ensaio à tração uniaxial e aspeto de provete no fim do ensaio

#### 2.7.2 WEDGE SPLITTING TEST

O WST foi desenvolvido inicialmente por Linsbauer e Tschegg[24] para determinar a energia de fratura do betão. Com aplicação de métodos de análise inversa é possível obter a lei constitutiva do material [25]. Na Fig. 2.16 representa-se esquematicamente o ensaio. Basicamente, consiste em aplicar uma força vertical num perfil de aço equipado com duas cunhas que convertem o carregamento vertical em horizontal. À medida que as cunhas vão sendo carregadas, penetram entre duas peças metálicas equipadas com rolamentos que se deslocam horizontalmente. [26]

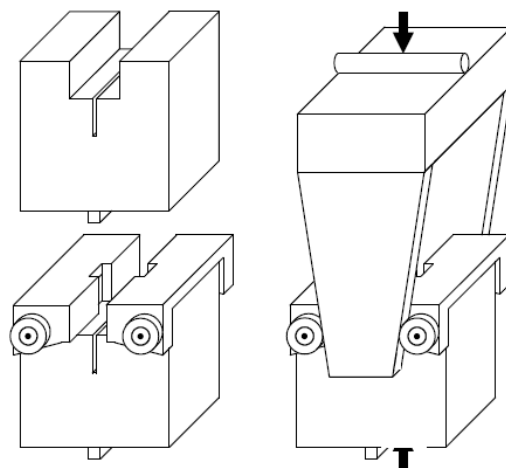


Fig.2. 17 Esquema representativo do ensaio Wedge splitting test [24]

A Fig.2.17 permite observar a poupança de material que é feita neste ensaio relativamente ao ensaio de flexão sob 3 pontos [26].

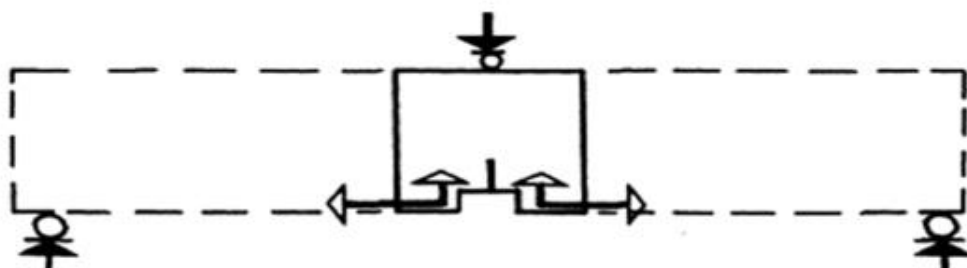


Fig.2. 18 Comparação entre o ensaio de flexão sob 3 pontos e o ensaio Wedge splitting test [19]

### 2.7.3 DOUBLE-EDGE WEDGE SPLITTING TEST

O DEWST permite, tal como o ensaio de compressão direto, medir a força de tração indirectamente a partir da aplicação de forças de compressão. Apesar de derivar do método brasileiro, aqui são utilizados dois entalhes que permitem obter uma secção em tração pura.

Como pode ser visto na Fig.2.18, este ensaio pode ser visto como um ensaio de tração compacto no qual se ensaia a parte central [26].

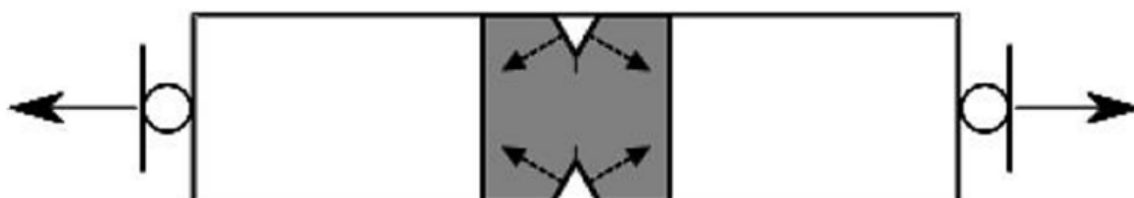


Fig.2.19 Comparação entre o ensaio Double- Edge wedge splitting test e o ensaio à tração uniaxial [19]

Nos provetes devem ser feitos entalhes de  $45^\circ$  onde são fixas placas de aço, cujo coeficiente de atrito é conhecido. [26]

A abertura da fenda é medida através da instalação de LVDT's e a carga aplicada é registada através de uma célula de carga. Um LVDT ("linear voltage diferencial transducer") é, basicamente, um sensor capaz de medir deslocamentos lineares. O funcionamento desse sensor é baseado em três bobinas e um núcleo cilíndrico de material ferromagnético de alta permeabilidade. A saída é um sinal linear, proporcional ao deslocamento do núcleo, que está fixado ou em contacto com o que se deseja medir.

Uma célula de carga é um transdutor que permite aquisição da força de compressão aplicado sobre ela. Estes dois dispositivos estão representados na Fig.2.19. [1]



Fig.2.20 Representação de um LVDT à esquerda e uma célula de carga à direita [5]



# 3

## ESTUDO DA COMPOSIÇÃO

### 3.1 INTRODUÇÃO

O presente material em estudo surge, como já foi referido, no âmbito dum projecto desenvolvido pelo LABEST que tem como objectivo principal estudar e desenvolver de composições de BEDRF robustas e eco-eficientes dimensionadas à medida das exigências de desempenho, para demonstrar as vantagens e aplicabilidade deste material usados em elementos pré-fabricados esbeltos e em aplicações de reparação/reabilitação. Espera-se também que este material consiga resistir, pelo menos, a 10MPa à tração e 60Mpa à compressão. Como solução mais adequada para estes desafios, tem-se o betão de elevada resistência reforçado com fibras que permitem, entre outras vantagens, diminuir a quantidade de armadura à tração necessária. A par da introdução das fibras, irá ser introduzido, como já foi referido também, o metacaulino como substituto da sílica de fumo, sendo o nosso estudo, a partir deste capítulo, focado essencialmente nesta adição e nas alterações que provoca nas características do betão. A mistura auto-compactável permite, por outro lado, garantir o perfeito enchimento das cofragens sem recurso à vibração.

Neste capítulo irão ser caracterizados os diversos materiais constituintes que fazem parte deste material e que permitem a garantia da sua eficiência, bem como os resultados de um conjunto de ensaios no estado fresco e endurecido e que permitiu comparar e evidenciar as vantagens ou desvantagens da utilização das fibras conjuntamente com o metacaulino.

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 3.2.1 CIMENTO

De acordo com a norma Europeia EN 197-1, o cimento é um ligante hidráulico, isto é, um material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água forma uma pasta que ganha presa e endurece por reacções e processos de hidratação e que, depois de endurecido, conserva a sua capacidade resistente, mesmo debaixo de água [5].

Segundo a mesma norma os cimentos são agrupados em 5 grupos:

- CEM I – Cimento Portland
- CEM II – Cimento Portland Composto
- CEM III – Cimento de Alto Forno
- CEM IV – Cimento Pozolânico
- CEM V – Cimento Composto

Sendo que as diferenças principais entre eles se prendem com seus componentes.

A nível estrutural, as normas NP EN 197-1 e NP 4326 classificam o cimento de acordo com a sua resistência em cimentos de endurecimento normal e rápido, sendo que os últimos são aqueles cuja resistência é elevada nos primeiros dias, enquanto os normais demoram mais tempo para atingir a mesma resistência.

Neste trabalho utilizou-se um cimento de Portland de endurecimento rápido – CEM I 42,5R fornecido pela Secil – Outão.

No Quadro 2 apresentam-se as características mecânicas, físicas e químicas do cimento.

Quadro 2 – Características do cimento [5]

Ensaio Mecânicos (MPa)		Ensaio Químicos (%)		Ensaio Físicos	
Res. À flexão 2 dias	6,1	SiO <sub>2</sub>	19,82	Massa Volúmica	3160 kg/m <sup>3</sup>
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,22		
Res. À flexão 7 dias	7,8	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,40	Superfície Específica	3820 kg/m <sup>3</sup>
		CaO total	62,66		
Res. À flexão 28 dias	8,9	MgO	2,21	Resíduo 45 µm	2%
		SO <sub>3</sub>	3,47		
Res. À compressão 2 dias	33,4	Perda ao fogo	3,0	Água na Pasta Normal	28,7 %
Res. À compressão 7 dias	46,6	Cloretos	0,03	Tempo de Início de Presa	127 min
		Cal Livre	1,28		
Res. À compressão 28 dias	58,1	Resíduo Insolúvel	1,1	Tempo de Fim de Presa	162 min

Através da técnica de difracção a laser foi possível determinar a curva granulométrica do cimento utilizado que se mostra na Fig.3.1 e através do microscópio electrónico de varrimento obteve-se a Fig.3.2 onde se pode observar-se forma das partículas do CEM I 42,5R cujo tamanho médio é de 14,6 µm.

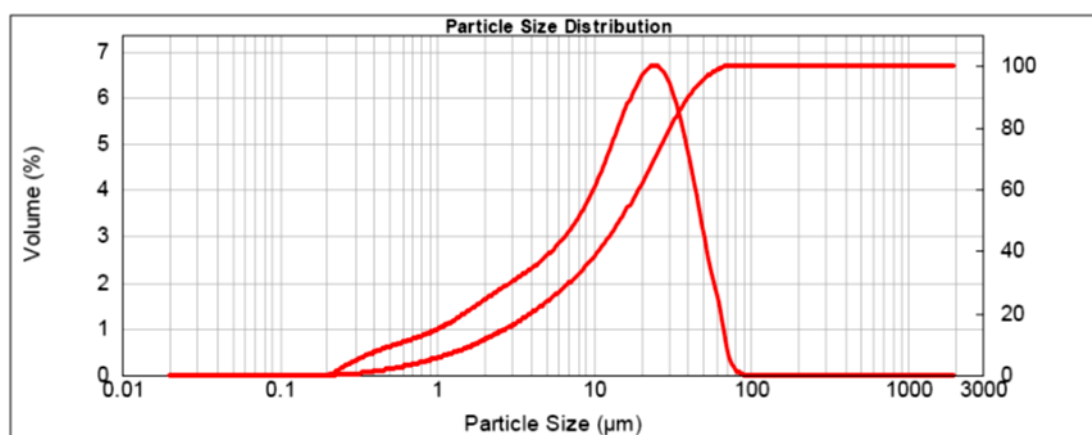


Fig.3. 1 Curva granulométrica do CEM 42,5R obtida através da técnica de difracção a laser



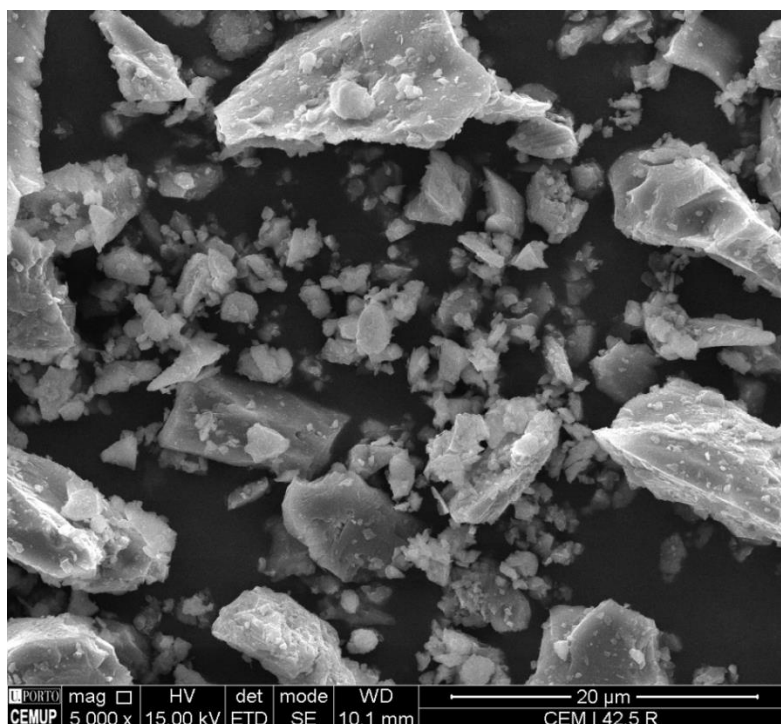


Fig.3. 2 Imagem obtida do microscópio electrónico de varrimento das partículas do cimento utilizado

### 3.2.2 FILER CALCÁRIO

Uma das adições utilizadas foi o filer BETOCARB P1-OU da Comital com as características abaixo apresentadas no Quadro 3. Nas Fig.3.3 e Fig.3.4 mostra-se a curva granulométrica do material em questão bem como uma imagem pormenorizada dos grãos do filer, respetivamente.

Quadro 3 – Características do Filler BETOCARB P1-OU utilizado

Ensaio Químicos (%)	
CaCO <sub>3</sub>	99
MgCO <sub>3</sub>	0,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02
Insolúveis em HCl	0,2
Sulfatos solúveis em Ácido	< 0,05
Cloretos	< 0,001
Enxofre Total	< 0,04
Ensaio Físicos	
Massa Volúmica	2680 kg/m <sup>3</sup>
Densidade Aparente	900 kg/m <sup>3</sup>
Teor de Humidade	0,1 %
Azul de Metileno	0,06 g/ 100 g
Partículas < 2 mm	100%
Partículas < 125 µm	99%
Partículas < 63 µm	85%

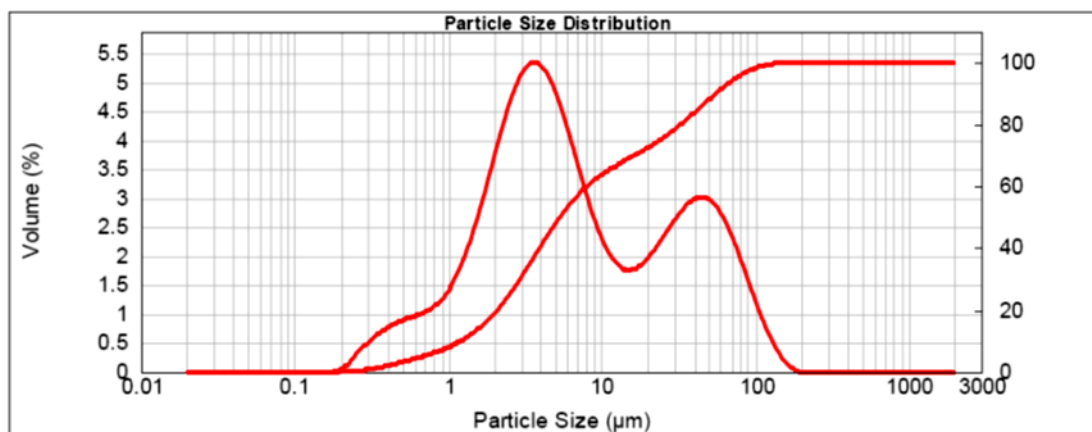


Fig.3.3 Curva granulométrica do filer

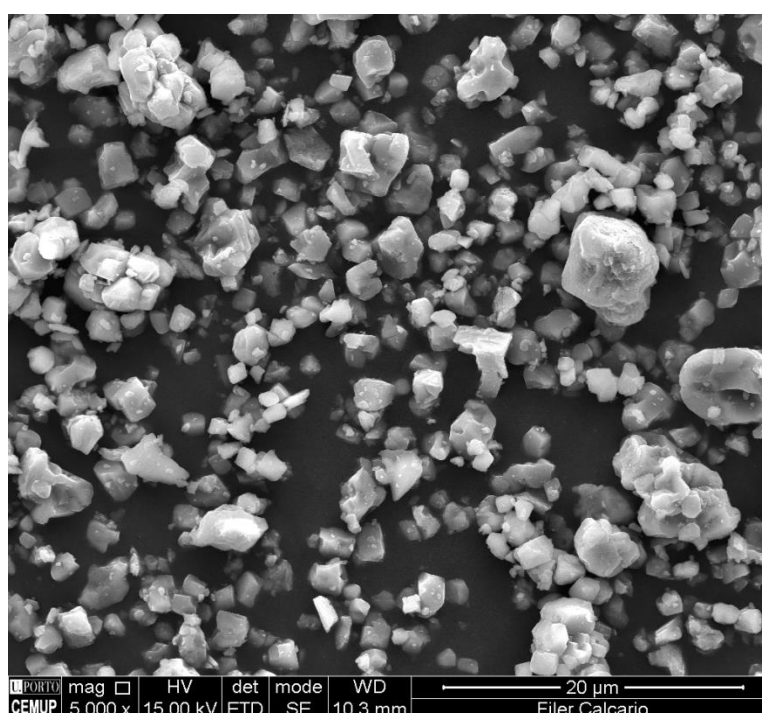


Fig.3.4 Pormenor das partículas do filer calcário obtidas através do microscópio de varrimento

Os filers são partículas não reactivas que, quando finamente moídas e misturadas com o cimento, melhoram a granulometria do total das partículas a incorporar na mistura do betão, levando a uma consequente redução da quantidade de água e da porosidade da pasta. Dado este efeito, os filers conseguem conferir benefícios ao betão melhorando as suas propriedades.

### 3.2.3 AGREGADO FINO

A areia utilizada na composição e da qual se apresenta na Fig.3.5 a respectiva curva granulométrica, é uma areia natural proveniente das dunas de Ovar, com uma massa volúmica de 2630 Kg/m<sup>3</sup> e uma absorção de 0,2%.

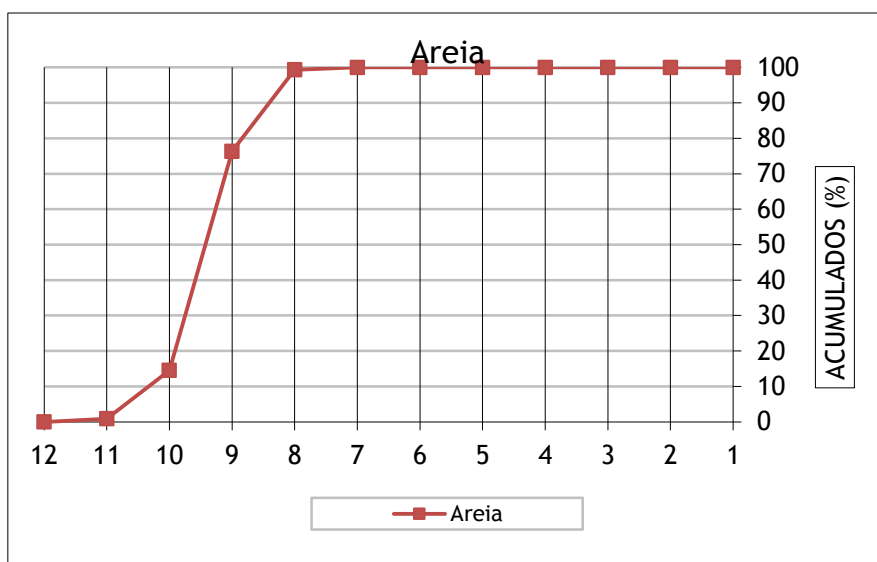


Fig.3. 5 Curva granulométrica do agregado fino

A ausência de agregado grosso contribui para aumentar a homogeneidade do material, diminuindo o desenvolvimento de microfissuras que ocorrem junto às paredes do agregado, aumentando a durabilidade e resistência do material. Esta é uma das principais diferenças entre o betão de elevado desempenho e o betão convencional.

#### 3.2.4 SÍLICA DE FUMO

A composição adotada como referência no presente trabalho incorporou sílica de fumo (Centrlit Fume SX) em suspensão com 50% de teor em sólidos, fornecida pela MC-Bauchemie com uma densidade de 2,68.

As partículas da sílica de fumo apresentam uma forma esférica com dimensões 50 a 100 vezes menores do que o cimento, sendo da ordem dos 0,01 a 0,5µm como se pode observar na Fig.3.6.

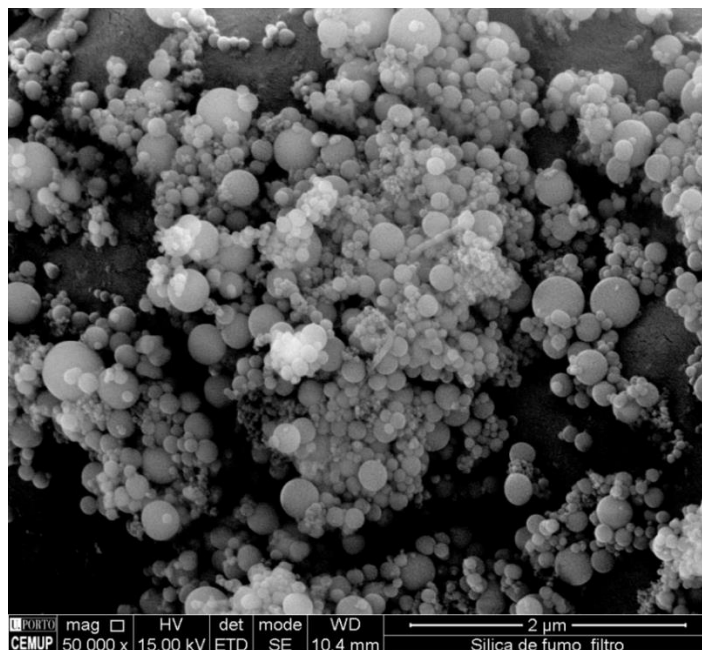


Fig.3. 6 Partículas da sílica de fumo observadas ao microscópio de varrimento

As suas partículas têm o efeito de filler no cimento, sendo que, por serem muito pequenas preenchem os espaços entre os grãos de cimento reduzindo assim o volume de vazios, que se

traduz por uma menor permeabilidade e consequente maior durabilidade. A sua introdução tem como objectivo acelerar e melhorar a produção de gel-CSH ou silicato de cálcio hidratado (CSH) proveniente da hidratação do cimento.

### 3.2.5 METACAUPLINO

O metacaulino é uma adição com características semelhantes à sílica de fumo, tendo no entanto partículas de maiores dimensões e forma muito distinta da sílica de fumo.

Utilizou-se um Metacaulino com uma massa volúmica de  $2200 \text{ Kg/m}^3$  fornecido pela Comital. É possível ter uma visão pormenorizada das partículas na Fig.3.7.

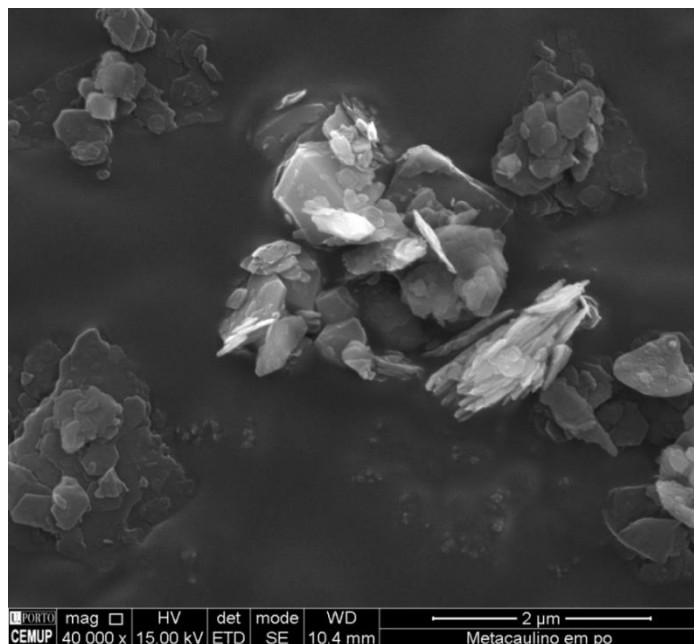


Fig.3. 7 Partículas do Metacaulino observadas pelo microscópio electrónico.

Os grãos têm uma forma mais alongada, em placas, e não uma forma esférica como era o caso da sílica de fumo, o que poderá resultar numa possível redução da trabalhabilidade e aumento da quantidade de água necessária para obtermos a mesma trabalhabilidade.

As características químicas e físicas estão resumidas no quadro 4.

Quadro 4 – Características químicas e físicas do metacaulino

Metacaulino	
SiO <sub>2</sub> %	52.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	45.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	0.46
CaO %	<0.50
MgO %	<0.50
SO <sub>3</sub> %	<0.10
Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> %	<0.50
K <sub>2</sub> O %	<0.50
TiO <sub>2</sub>	1.50
MnO	<0.30
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<0.30
Resistência ao fogo %	1.50
Resíduos insolúveis %	61
Densidade específica g/cm <sup>3</sup>	2.21
Blaine cm <sup>2</sup> /g	31678
Resíduos, 90µm (%)	0.00
Resíduos 45µm (%)	1.09
Resíduos 32µm (%)	2.55
Dimensão principal	7.12

Para além de preencherem os espaços entre as partículas de cimento, melhorando a compacidade do material, os grãos de metacaulino aceleram a hidratação do cimento Portland. A reação pozolânica ocorre entre os silicatos e aluminatos causados pela dissolução do metacaulino e o hidróxido de cálcio originado pela hidratação do cimento, gerando maior quantidade de gel CSH.

Materiais como a sílica de fumo e o metacaulino reagem com o hidróxido de cálcio libertado durante a hidratação do cimento, aumentando o calor de hidratação devido ao efeito da reação exotérmica da reação pozolânica, em comparação com o cimento Portland natural.

### 3.2.6 SUPERPLASTIFICANTE

Utilizou-se o superplastificante Sika Viscocrete 20HE, constituído por carboxilato modificado com uma densidade de 1,08% e 40% de teor em sólidos.

De acordo com a norma NP EN 934 – (2009), os superplastificantes são adjuvantes que, sem modificar a sua consistência, permitem reduzir a dosagem de água do betão, ou, sem esta redução, aumentam o espalhamento consideravelmente.

As partículas de cimento têm grande propensão à criação de flocos, o que provoca a retenção das moléculas de água nos seus grãos aumentando a viscosidade do material e diminuindo a trabalhabilidade. O uso de superplastificantes cria uma capa de adsorção de grande volume em torno dos grãos de cimento impedindo esta floculação e facilitando a fluidez da pasta.

No quadro 5 resumem-se as características principais do superplastificante utilizado fornecida pela Sika:

Quadro 5 – Características do superplastificante Viscocrete 20HE

Sika Viscocrete 20HE	
Base	Solução aquosa de polímeros acrílicos modificados
Aspeto	Líquido Castanho Claro, Turvo
Massa Volúmica	$1,08 \pm 0,02 \text{ kg/dm}^3$
pH	$4,3 \pm 1,0$
Teor de Sólidos	$40,0 \pm 2,0\%$
Teor em Cloretos	$\leq 0,1 \%$

### 3.2.7 FIBRAS

Foram utilizadas microfibras lisas de secção circular com 12,5; 12; 9 e 6 mm de comprimento fornecidas pela Krampeharex provenientes da Alemanha, cujas superfícies podem ser observadas na Fig.3.8 e cujas características podem ser analisadas no quadro 6.

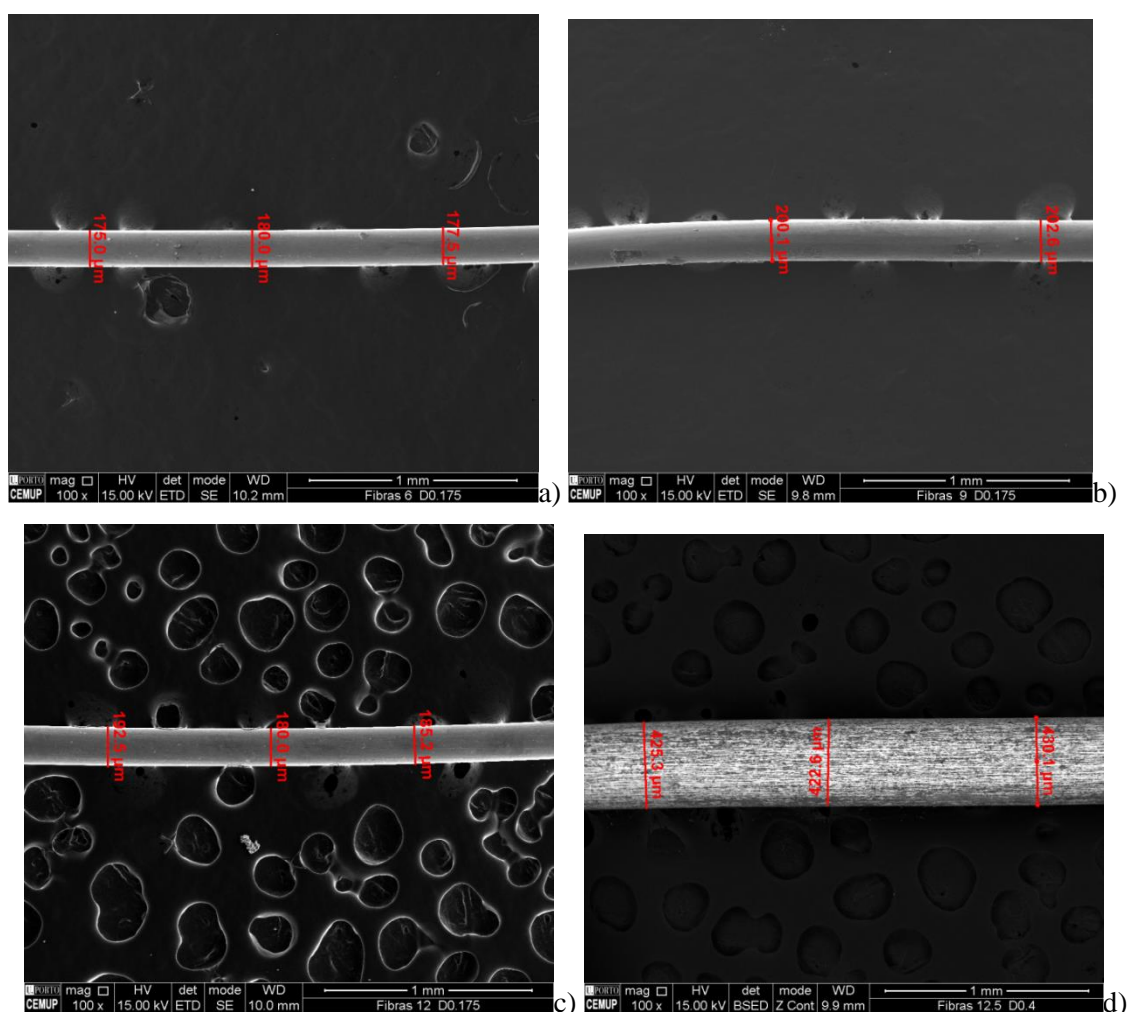


Fig.3. 8 Superfície das fibras utilizadas observada ao microscópio de varrimento: a)fibra de 6mm de comprimento;b)fibra de 9mm de comprimento; c)fibra de 12mm de comprimento; d)fibra de 12,5mm de comprimento

Quadro 6 Características das fibras fornecidas pela KrampeHarex

Nome	Resistência à tração (MPa)	lf(mm)	df(mm)	lf/df
KrampeHarex DM	2100	6	0,175	34
		9	0,175	51
		12	0,175	69
	1250	12,5	0,4	31

A introdução de fibras na composição do betão irá influenciar muito a resposta do material à tracção, uma vez que as fibras criam um efeito de ponte costurando as fissuras, impedindo, desta forma, a sua propagação e aumentando, assim, a sua resistência. Na Fig.3.9 mostram-se os diferentes níveis de resistência consoante as diferentes composições tendo por base um betão com a composição normal. As fissuras propagam-se mais lentamente, conferindo maior resistência ao material num betão com maior quantidade de agregado, Fig.3.9 b). No caso de betões reforçados com fibras, Fig.3.9 c) e d), o controlo do desenvolvimento das microfissuras aumenta com a quantidade de fibras presentes nas zonas de fissuração. Como se pode ver na Fig.3.9 d), quanto menor for o espaçamento entre as fibras, mais lenta é a propagação da fissura.

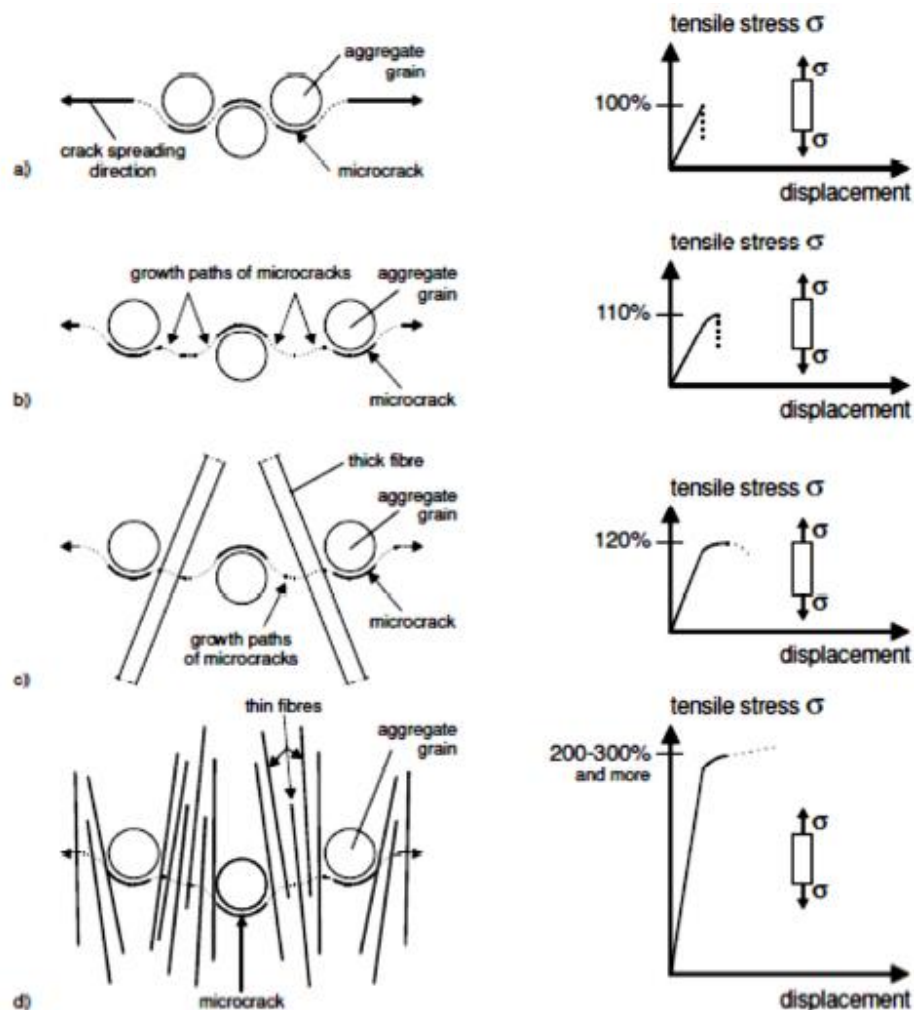




Fig.3. 9 Resistência à tração: a) betão simples com grande quantidade de agregado; b) betão simples sem contacto entre as partículas de agregado; c) betão reforçado com fibras; d) betão reforçado com microfibras. [1]

### 3.3 CÁLCULO DA ÁGUA LIVRE PARA PASTAS

#### 3.3.1 DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO

A densidade de empacotamento descreve até que ponto uma unidade de volume é preenchida com partículas. Quanto maior for a densidade de empacotamento, melhor serão as características do betão no estado endurecido, podendo, contudo, afetar a trabalhabilidade. Em geral, quanto mais extensa for a granulometria, melhor serão os resultados da densidade de empacotamento, uma vez que as partículas menores ocupam os vazios entre as de maiores dimensões [27].

É possível calcular a densidade de empacotamento duma determinada mistura através do cálculo da respectiva água livre. Quanto mais elevado for o volume de água separado da pasta após a centrifugação, maior é o grau de compactação dos constituintes da mistura. Como se pode observar na Fig.3.10, após a centrifugação, parte da água será utilizada para preencher espaços vazios (“void water”) e a restante fica na superfície (excesso de água ou água livre) [27].

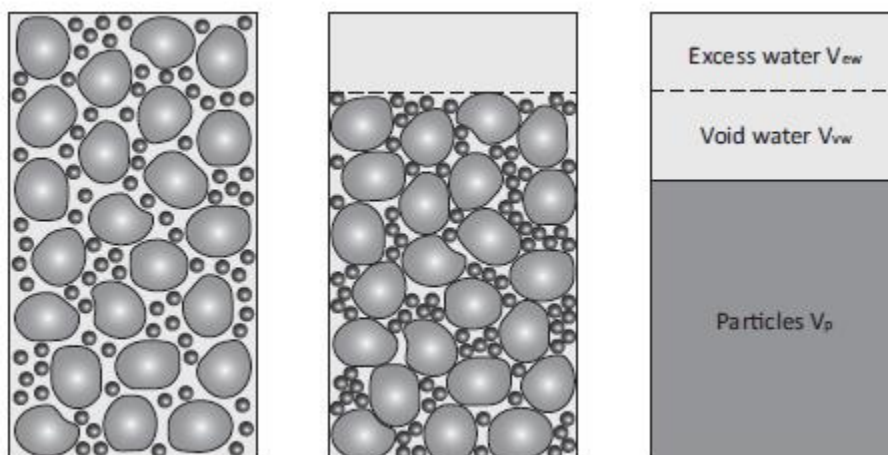


Fig.3. 10 Representação da compactação da pasta depois da centrifugação [27]

Foram realizadas 18 experiências com 15 composições diferentes para a determinação da água livre em cada uma. No quadro 5 é possível observar as diferentes composições, sendo que as quantidades de cada material constituinte se apresentam em  $\text{kg/m}^3$ .



Quadro 7 – Composições das pastas testadas em kg/m<sup>3</sup>

	Cimento	Filer calcário	Água	Superplastificante (20HE)	Metacaulino	w/c
C1	250	121,45	147,43	4,28	56,25	0,59
F1	258,37	156,82	139,38	4,54	38,76	0,54
F2	285,71	88,33	154,64	4,17	42,86	0,54
F3	218,62	197,79	139,41	4,49	32,79	0,64
F4	241,76	133,65	154,67	4,12	26,26	0,64
F5	258,37	109,61	139,43	4,45	77,51	0,54
F6	258,71	36,13	154,7	4,08	85,71	0,60
F7	218,62	157,85	139,45	4,42	65,59	0,64
F8	241,76	89,47	154,72	4,04	72,53	0,64
CC1	227,05	184,12	133,46	4,62	51,09	0,59
CC2	269,39	68,51	159,24	3,99	60,61	0,59
CC3	290,75	75,72	147,41	4,32	65,42	0,51
CC4	219,27	155,94	147,45	4,25	43,34	0,67
CC5	250	159,87	147,39	4,35	24,72	0,59
CC6	250	83,04	147,48	4,21	87,78	0,59

O procedimento que se adoptou para a obtenção das pastas com as composições mostradas anteriormente foi o seguinte [28]:

1. Os finos e a água foram misturados durante 120 seg a 750 rpm.
2. Adicionou-se o superplastificante e misturou-se durante 120 seg a 750 rpm.
3. Deixou-se repousar a mistura durante 60 seg.
4. Misturou-se durante mais 120 seg a uma velocidade de 2000 rpm.

O procedimento utilizado está melhor evidenciado pelo conjunto de imagens apresentado na Fig.3.11.



a)



b)

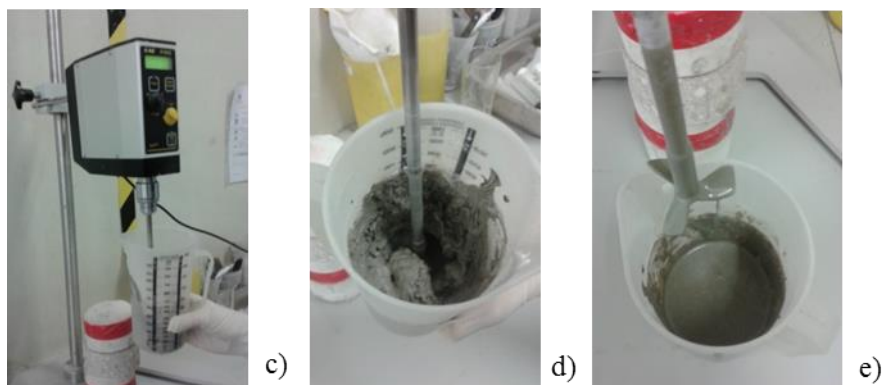


Fig.3. 11 Procedimento de amassadura das pastas: a) materiais utilizados; b) aspeto inicial da pasta antes de se iniciar a mistura; c) misturadora; d) mistura; e) aspeto final da pasta.

### 3.3.2 CÁLCULO DA ÁGUA LIVRE

A determinação da água livre, isto é, a água que não fica aprisionada entre as partículas e que se pode mover por entre elas, através do método da centrifugação consiste em medir a quantidade de água através da centrifugação e compará-la com a água total da amostra inicial.

Por outras palavras, quanto mais água estiver à superfície no final da centrifugação, maior é a compacidade da pasta.

Foi usado o teste da consolidação por centrifugação para calcular a água livre de 18 pastas com composições diferentes incorporando metacaulino. A pasta foi inserida em quatro tubos de ensaio, perfazendo um total de 30 ml por tubo, que foram levados ao equipamento de centrifugação programado para 3500 r.p.m durante 15 mins. Após este processo, as partículas da pasta estavam compactadas e a água livre encontrava-se à superfície tendo sido removida com ajuda de uma pipeta. As várias fases deste procedimento estão apresentadas na Fig.3.12. O peso dos tubos foi medido antes e depois de extraída a água separada através do processo de centrifugação, sendo a água livre das 18 misturas calculada através da formula1:

$$W_{free} = \frac{W_{final} - W_{inicial}}{V_{pasta}} \quad (1)$$

sendo que,

- $W_{inicial}$  e  $W_{final}$  – peso dos tubos de ensaio antes e depois da centrifugação
- $V_{pasta}$  – volume da pasta de cada provete

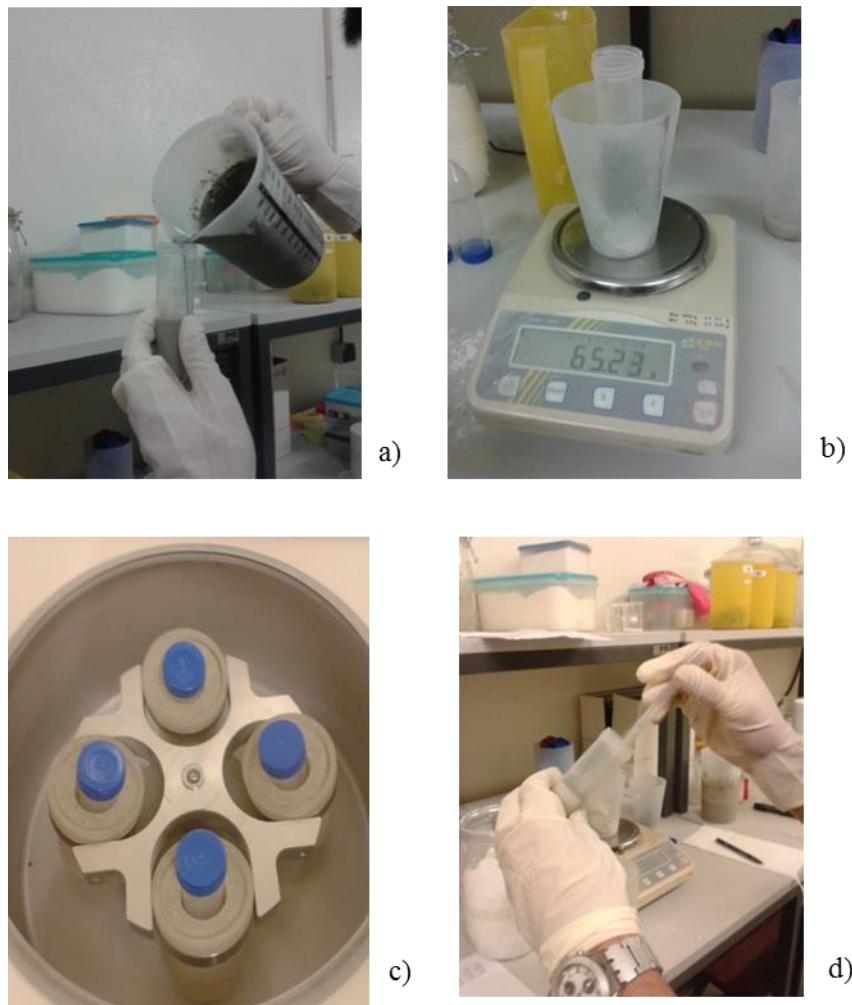


Fig.3. 12 Procedimento para o cálculo da água livre: a) Introdução da pasta num tubo de ensaio; b) Pesagem do provete antes da centrifugação; c) Provete no aparelho centrifugador; d) Retirada da água livre com uma pipeta.

Os resultados das pesagens efectuadas para cada mistura testada (quatro para cada pasta testada) são apresentados no quadro 7, bem como o respetivo resultado da água livre. Sendo que, as densidades volúmicas iniciais são designadas por P e as densidades volúmicas após a retirada da água livre são designadas por P'.

Quadro 8 – Resultados das densidades volúmicas e água livre de cada provete

	C1	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	CC1	CC2	CC3	CC4	CC5	CC6
P1(gr)	67,60	66,87	64,33	66,00	64,60	66,76	66,73	66,33	63,04	67,10	63,65	64,21	68,34	64,97	63,82
P2(gr)	67,56	66,61	65,07	66,36	64,00	66,52	66,93	65,96	63,22	67,71	62,20	65,40	67,40	63,93	63,52
P3(gr)	68,09	66,43	64,78	66,38	64,36	66,78	65,90	66,03	63,29	67,23	63,63	65,82	66,48	63,65	64,25
P4(gr)	67,52	66,71	64,48	66,18	64,42	66,35	66,20	65,77	63,43	67,95	63,66	65,13	67,37	65,17	63,32
P'1(gr)	64,14	63,67	60,03	62,27	60,04	64,10	63,86	63,41	59,34	64,33	59,43	61,45	64,20	60,73	60,87
P'2(gr)	64,08	63,41	60,70	62,53	59,44	63,88	64,11	63,04	59,38	64,93	57,90	62,59	63,38	59,73	60,59
P'3(gr)	64,61	63,23	60,37	62,54	59,69	64,09	63,18	63,14	59,48	64,45	59,41	63,01	62,58	59,55	61,27
P'4(gr)	64,07	63,50	60,14	62,36	59,76	63,67	63,44	62,87	59,62	65,11	59,11	62,38	63,38	61,12	60,37
Wfree1 (Kg/m3)	115,33	106,67	143,33	124,33	152,00	88,67	95,67	97,33	123,33	92,33	140,67	92,00	138,00	141,33	98,33
Wfree2 (Kg/m3)	116,00	106,67	145,67	127,67	152,00	88,00	94,00	97,33	128,00	92,67	143,33	93,67	134,00	140,00	97,67
Wfree3 (Kg/m3)	116,00	106,67	147,00	128,00	155,67	89,67	90,67	96,33	127,00	92,67	140,67	93,67	130,00	136,67	99,33
Wfree4 (Kg/m3)	115,00	107,00	144,67	127,33	155,33	89,33	92,00	96,67	127,00	94,67	151,67	91,67	133,00	135,00	98,33
Wfree,medio(kg/m3)	115,58	106,75	145,17	126,83	153,75	88,92	93,08	96,92	126,33	93,08	144,08	92,75	133,75	138,25	98,42

De forma a tornar mais perceptível os resultados da água livre para cada provete, apresenta-se o gráfico da Fig.3.13:

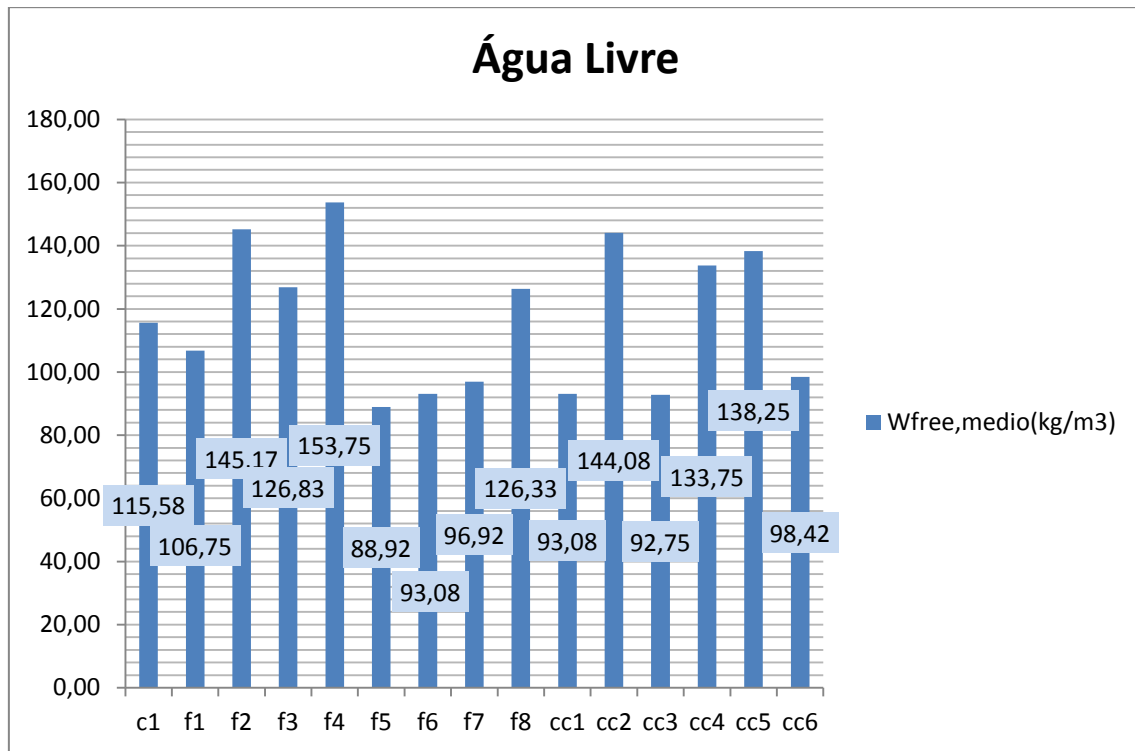


Fig.3.13 Água livre de cada provete

Comparando agora os resultados da água livre com as composições em volume apresentadas no gráfico da Fig.3.14 é possível retirar algumas conclusões.

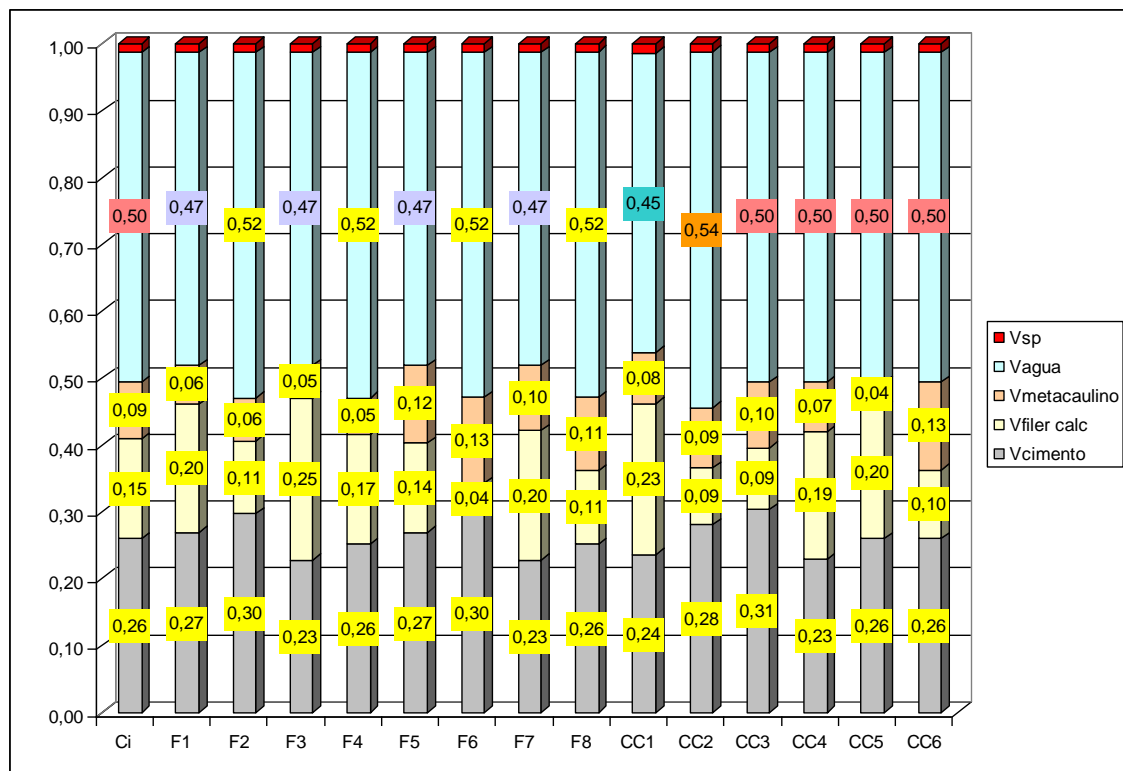


Fig.3.14 Composição das diversas pastas em estudo

Como se pode ver na figura 3.14 algumas composições têm a mesma quantidade de água. Estas representam-se no gráfico acima com a mesma cor. Existem, então, três volumes de água que se repetem, nomeadamente 0,5L, 0,47L e 0,52L. Cruzando estes resultados com os da água livre, percebe-se que, apesar da quantidade de água introduzida ser a mesma, os valores da água livre foram distintos. Posto isto, e como o procedimento utilizado foi o mesmo para todos os ensaios, há que analisar os restantes componentes verificando se estes podem estar ligados com as variações de água livre.

Pelo Quadro 9 é possível fazer essa comparação de forma rápida. Assinaladas com a mesma cor estão as composições com a mesma quantidade de água inserida. Para cada conjunto de composições, seleccionou-se aquela com maior quantidade de água livre, assinalada a negrito, uma vez que o objectivo é obter a maior compacidade possível da mistura. Analisando estas três composições verificam-se alguns factores em comum, nomeadamente:

- De todas as misturas em que se inseriu a mesma quantidade de água, aquelas que apresentam maior quantidade de água livre, são as que têm menor quantidade de cimento na sua composição;
- Estas mesmas misturas têm maior percentagem de filer calcário;
- Menor percentagem de Metacaulino.

Quadro 9 – Análise comparativa entre composições e água livre

	Cimento	Filer calcário	Metacaulino	Wfree
C1	58,50%	28,40%	13,20%	115,58
F1	56,90%	34,50%	8,50%	106,75
F2	68,50%	21,20%	10,30%	145,17
<b>F3</b>	<b>48,70%</b>	<b>44,00%</b>	<b>7,30%</b>	<b>126,83</b>
<b>F4</b>	<b>58,70%</b>	<b>32,50%</b>	<b>8,80%</b>	<b>153,75</b>
F5	58,00%	24,60%	17,40%	88,92
F6	70,10%	8,90%	21,00%	93,80
F7	49,50%	35,70%	14,80%	96,92
F8	59,90%	22,20%	18,00%	126,33
CC1	49,10%	39,80%	11,10%	93,08
CC2	67,60%	17,20%	15,20%	144,08
CC3	67,30%	17,50%	15,10%	92,75
CC4	51,60%	36,70%	11,60%	133,75
<b>CC5</b>	<b>57,50%</b>	<b>36,80%</b>	<b>5,70%</b>	<b>138,25</b>
CC6	59,40%	19,70%	20,90%	98,42

De seguida apresentam-se dois triângulos, o primeiro onde se observam os pontos com composições estudadas – Fig.3.15 e no segundo, uma variação de cores do azul para o vermelho consoante o aumento da densidade de empacotamento ao longo das diferentes misturas – Fig.3.16. Este método baseia-se num logaritmo da cálculo desenvolvido anteriormente no âmbito de uma tese de doutoramento, sendo que a sua foi feita a sua utilização direta. De todos os pontos representados no primeiro triângulo, escolheram-se três composições da zona mais vermelha para o estudo ao nível da argamassa (ver Quadro 10).

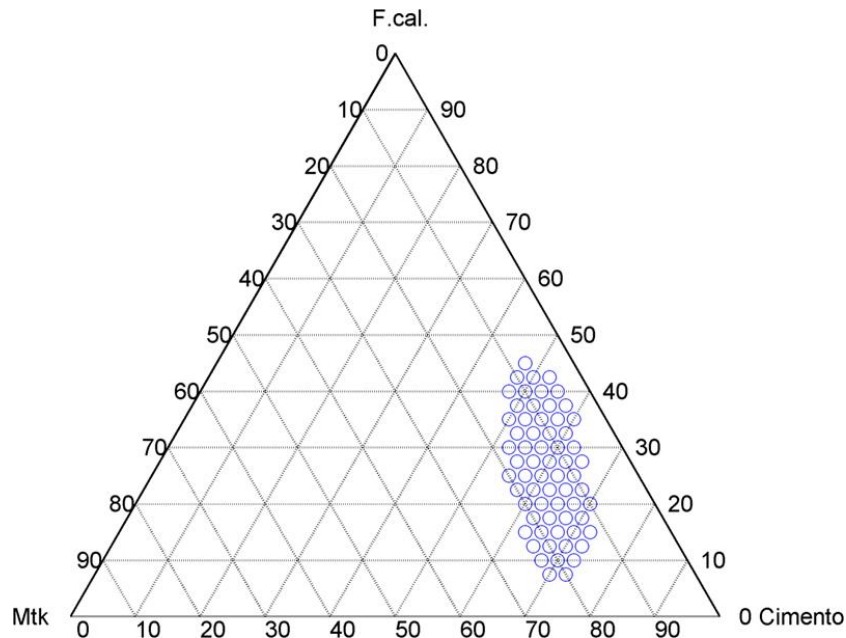


Fig.3. 15 – Representação de diversas composições de finos estudadas no triângulo de Feret

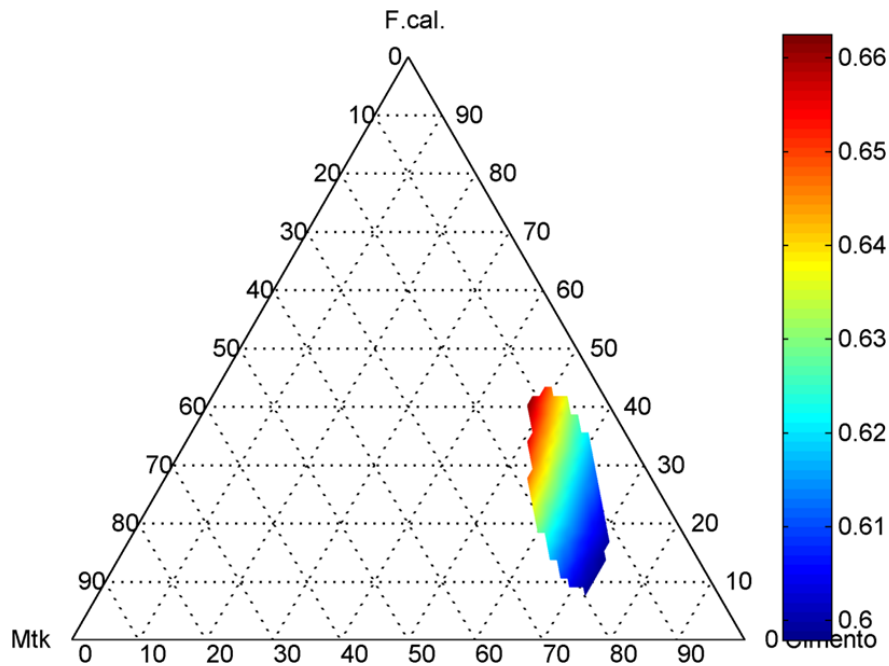


Fig.3. 16 Densidade de empacotamento das misturas de finos estudadas do menos compacto (azul) para o mais compacto (vermelho)

Quadro 10 – Composições finais a ser utilizados nos estudos das argamassas

Cimento%	Metacaulino%	Filer calcário%
0,525	0,175	0,3
0,500	0,150	0,350
0,475	0,125	0,400

### 3.4 ESTUDO EM ARGAMASSA SEM FIBRAS

#### 3.4.1 DEFINIÇÃO DAS COMPOSIÇÕES FINAIS

Depois de escolhidas as composições das pastas segundo o procedimento descrito anteriormente, passou-se ao estudo de argamassas sem fibras tendo por base as três misturas escolhidas.

Para proceder à realização dos ensaios é necessário em primeiro lugar definir a composição final das três argamassas. Para além dos finos utilizados nas pastas adicionou-se também agregado fino.

Tendo como referência a argamassa já testada anteriormente no âmbito do projecto em que se insere este trabalho, que usa como adição a sílica de fumo e sabendo que a razão água cimento não deveria exceder muito o valor de 0,374, chegou-se às composições finais através das percentagens de finos apresentadas no Quadro 10.

Como inicialmente utilizamos uma misturadora de menores dimensões, optou-se por fazer 1,4 litros de cada uma.

No quadro 11 estão representadas as composições utilizadas, respeitando, como também é possível confirmar na mesma tabela, todos os pressupostos apresentados anteriormente.

Quadro 11 – Composições em kg/m<sup>3</sup> e em volume das argamassas

Argamassas com metacaulino	Massa volumica	mix 1 Composição (kg/m3)	mix 1 volume	mix 2 Composição (kg/m3)	mix 2 volume	mix3 Composição (kg/m3)	mix3 volume
Cimento CEM I 42.5 R	3160	548,63	0,174	532,50	0,16	515,38	0,16
Metacaulino	2200	182,88	0,083	159,75	0,07	135,63	0,06
Filer calcário	2680	313,50	0,117	372,75	0,13	434,00	0,16
Areia fina	2630	1019,86	0,388	1019,86	0,38	1019,86	0,39
Água	1000	205,00	0,205	198,50	0,19	191,50	0,19
Superplastificante	1080	19,855	0,018	20,23	0,02	20,62	0,02
Fibras	7850	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
		Volume		Volume		Volume	
		Finos (kg)	(m3)	Finos (kg)	(m3)	Finos (kg)	(m3)
		1045	0,985	1065	0,985	1085	0,985
		Sp/p	1,90%	Sp/p	1,90%	Sp/p	1,90%
		w/c	0,374	w/c	0,373	w/c	0,372

Para melhor se perceber a diferença na composição causada pela introdução do agregado fino apresenta-se na Fig.3.17 um gráfico representativo dos volumes de cada composto.



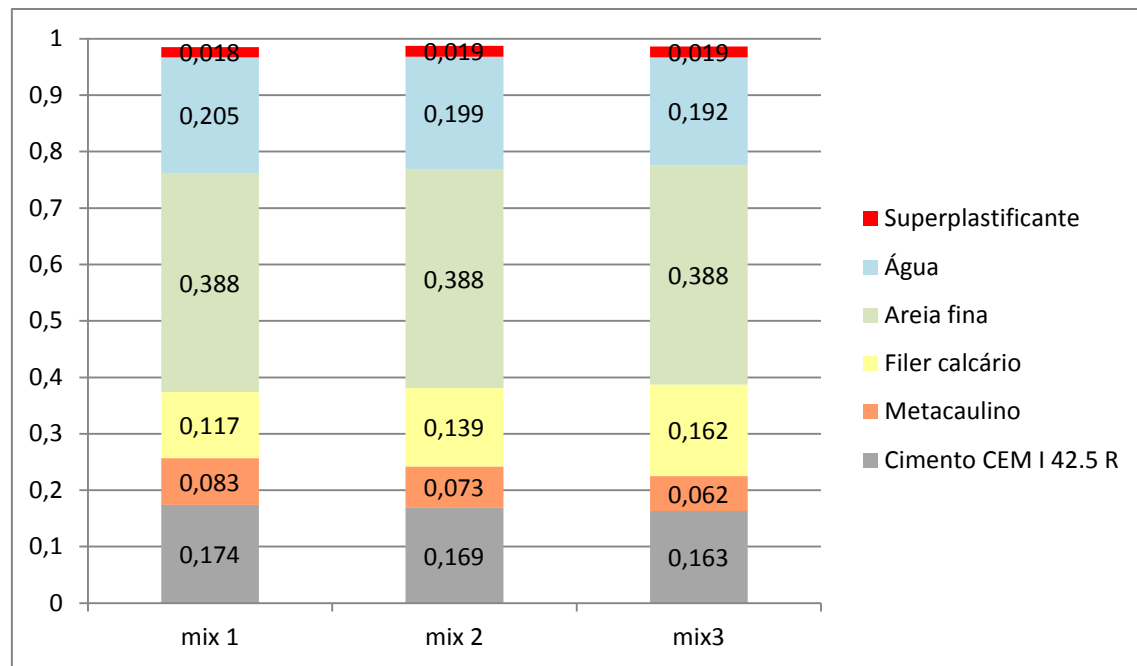


Fig.3. 17 Representação da composição das argamassas em volume

Uma vez que a misturadora utilizada tem dimensões bastante inferiores àquelas que seriam necessárias para proceder à amassadura das argamassas com as composições anteriores, foi necessário reduzir proporcionalmente cada composto para que fosse compatível com a capacidade da misturadora perfazendo, então, um total de 1,4 L.

### 3.4.2 AMASSADURA

Para cada composição seguiu-se o procedimento indicado no esquema da Fig. 3.18:

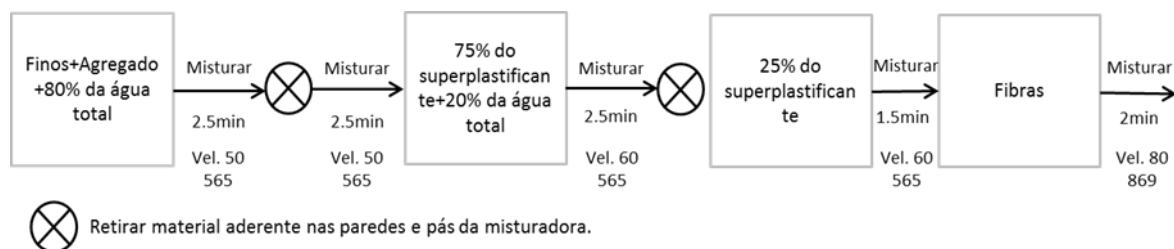


Fig.3. 18 Esquema representativo do procedimento de amassadura

As diferentes fases do processo de amassadura, bem como os materiais utilizados, estão ilustradas pela Fig.3.19.



Fig.3. 19 Fases do processo de amassadura: a) Diferentes componentes da mistura; b) introdução dos finos e da areia com a primeira quantidade de água; c) paragem da amassadura para introdução de superplastificante e restante água; d) aspeto final da mistura.

No final de cada amassadura realizaram-se dois ensaios – Ensaio de Espalhamento e Ensaio de Fluidez – com o objectivo de caracterizar trabalhabilidade de cada composição.

### 3.4.3 CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO FRESCO

Um requisito importante para a criação do BEDRF é a obtenção duma mistura auto-compactável. Desta forma é necessário garantir que o BEDRF tem, no estado fresco a trabalhabilidade pretendida como já foi referido anteriormente neste capítulo. Para tal fixaram-se valores base para os resultados dos ensaios realizados. Para o ensaio de espalhamento, o espalhamento mínimo deve rondar os 300 mm.

#### 3.4.3.1 ENSAIO DE ESPALHAMENTO

O procedimento utilizado neste ensaio consiste em encher um cone com a argamassa a testar, levantá-lo e deixar a mistura escoar sob uma superfície limpa e nivelada, medindo o diâmetro médio da área de espalhamento resultante após a cessação do movimento. A Fig. 3.20 procura clarificar melhor o procedimento.

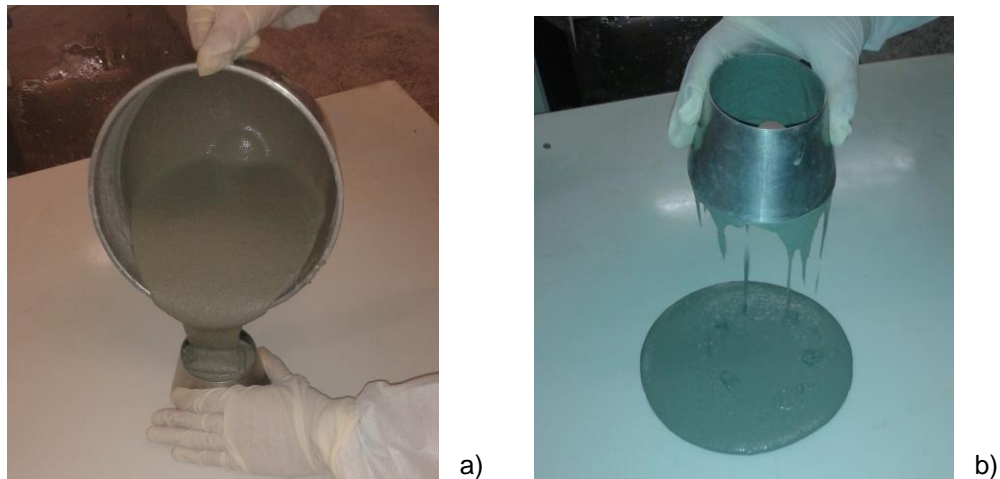


Fig.3. 20 Ensaio de espalhamento: a) enchimento do cone; b) levantamento do cone e espalhamento da argamassa

Os resultados obtidos deste ensaio podem ser observados no quadro 12:

Quadro 12 Resultados do ensaio de espalhamento para as três misturas

Mistura	Diâmetro em cada direção (mm)	Diâmetro médio (mm)
Mix 1	304	305
	306	
Mix 2	313	314,5
	316	
Mix 3	311	312,5
	314	

Pela análise da tabela anterior percebe-se que todas as composições superaram o espalhamento mínimo de 300 mm. Porém, é conveniente realizar outro ensaio, neste caso o ensaio de fluidez, para que se possa ter uma ideia mais precisa e correcta da trabalhabilidade e capacidades autocompactáveis do material em questão.

#### 3.4.3.2 ENSAIO FUNIL-V

No caso do ensaio de fluidez com o funil-V, o objectivo consiste em depois de encher o funil, registar o tempo que a argamassa demora a escoar do interior do mesmo, desde o momento da abertura até ao se observar o primeiro ponto de luz.

Na Fig. 3.21 pode observar-se o equipamento utilizado e, no Quadro 13, o resultado do ensaio.

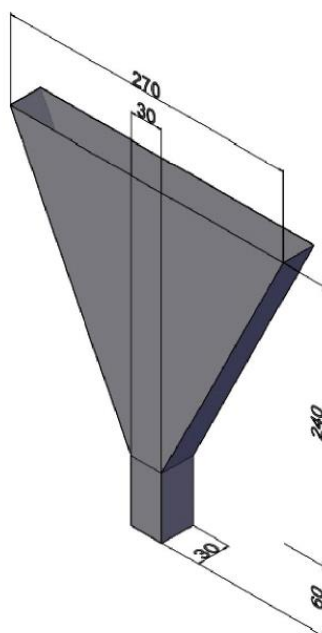


Fig.3. 21 Equipamento utilizado para o ensaio do Funil-V

Quadro 13 Resultados do ensaio do Funil-V para as três misturas

Mistura	Tempo de funil (s)
Mix 1	34,72
Mix 2	33,18
Mix 3	38,19

#### 3.4.4 CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO ENDURECIDO

Depois de realizados os testes para o estado fresco, foram avaliadas as tensões de tração e compressão para cada mistura. Foram utilizados 3 primas com dimensões  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  para cada composição como os que podem ser vistos na Fig.3.22. Os provetes foram desmoldados com 1 dia de idade e colocados numa câmara húmida à temperatura de  $20^\circ\text{C}$  e 100% de humidade relativa até à idade de 7 dias, altura em que foram retirados e testados.

A resistência mecânica depende, em elevado grau, das condições de amassadura, da preparação dos provetes e da natureza do ensaio escolhido.

O ensaio dos prismas  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  tem como principal objectivo, comparar as misturas entre si, evidenciando quais aquelas que apresentam um melhor comportamento mecânico.

Como se pode observar nas Fig. 3.23 e Fig. 3.24, este é um ensaio à flexão sob três pontos, aplicando uma carga vertical no centro do provete até à rotura, registando-se a força máxima de rotura por flexão de cada provete e fazendo-se a média final para os três.



Fig.3. 22 Molde para provetes 4x4x16cm<sup>3</sup>



Fig.3. 23 Equipamento utilizado para o ensaio à flexão

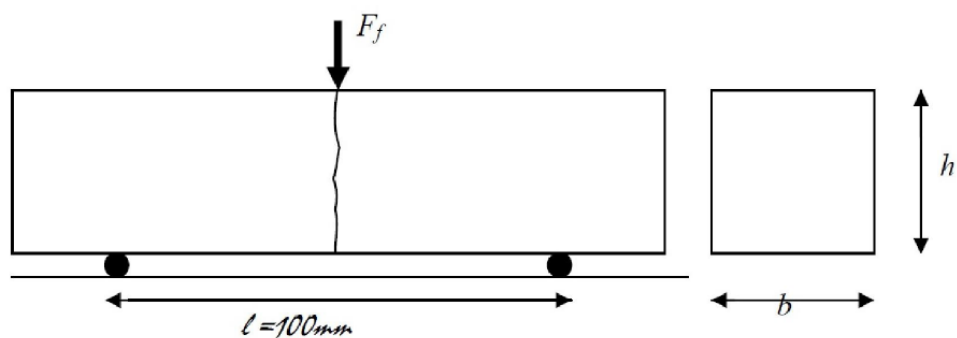


Fig.3. 24 Representação esquemática de aplicação de cargas para o ensaio à flexão

A resistência à tração por flexão é conseguida utilizando a fórmula (2):

$$f_t = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b h^2} \quad (2)$$

Em que:

$f_t$ -resistência à tração;

$F_f$  – força aplicada;

$l$ - comprimento do provete, neste caso 100mm;

$b$ - largura do provete

$h$ - altura do provete

A resistência à compressão é testada a partir dos meios primas resultantes do ensaio à tração, perfazendo um total de seis provetes por mistura. Em cada um deles é aplicado uma força crescente até à rotura como é ilustrado na Fig.3.25, registando-se a força máxima de rotura por compressão.

A resistência à compressão é dada pela expressão (3):

$$f_c = \frac{F_c}{40 \times 40} \quad (3)$$



Fig.3. 25 Equipamento utilizado para os ensaios à compressão

Os resultados dos dois ensaios estão resumidos no Quadro 14.

Quadro 14 Resultados da resistência à tração e compressão para todos os provetes de cada mistura

Mistura1					Mistura 2					Mistura 3				
Provetes	Resistência à tração (MPa)	Média	Resistência à compressão (Mpa)	Média	Provetes	Resistência à tração (Mpa)	Média	Resistência à compressão (Mpa)	Média	Provetes	Resistência à tração (Mpa)	Média	Resistência à compressão (Mpa)	Média
A	14,27				A	14,62				A	15,88			
B	14,24	14,66			B	13,38	14,75			B	14,22	15,23		
C	15,48				C	16,25				C	15,58			
D			88,44		D			84,85		D			84,47	
E			90,72		E			88,46		E			85,51	
F			90,49	92,55	F			84,99	87,91	F			82,57	84,01
G			93,47		G			86,54		G			86,29	
H			96,82		H			89,80		H			87,52	
I			95,34		I			92,80		I			77,72	



Pela análise de todos os ensaios realizados, tanto para o estado fresco como para o estado endurecido, foi escolhida a mistura 1 para prosseguir com o estudo da presente dissertação, onde serão introduzidas numa fase seguinte as fibras. Esta composição apresentou bons resultados para o estado fresco, bem como foi a que teve melhor desempenho mecânico para os ensaios aos 7 dias. Para além disso, é também a que tem maior percentagem de metacaulino, o que permitirá, chegar a melhores conclusões acerca da sua influência das características mecânicas para diferentes idades com diferentes percentagens de fibras. Passamos de seguida ao estudo de argamassas com a introdução de fibras para com a composição da mistura 1.

### 3.5 ESTUDO EM ARGAMASSA COM FIBRAS

#### 3.5.1 AMASSADURA

O processo de amassadura utilizado é igual àquele que foi já explicitado atrás neste capítulo no ponto 3.4.2, porém, e devido à introdução das fibras, o processo inclui mais duas etapas. No esquema da Fig.3.26 pode ver-se como se procedeu para a amassadura das argamassas, agora com a introdução de fibras.

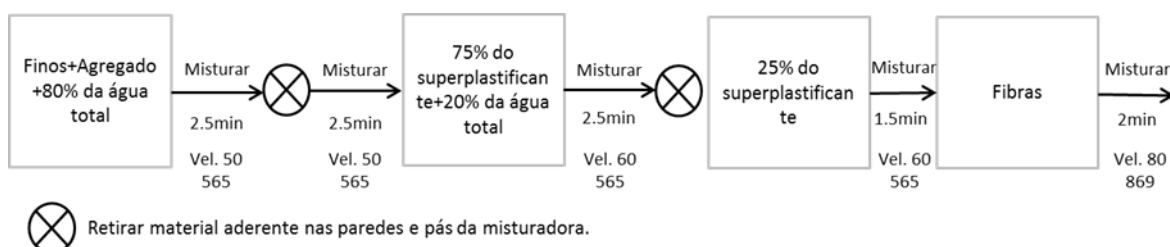


Fig.3.26 Representação esquemática do procedimento da amassadura da argamassa com fibras

Na Fig.3.27 podem observar-se as fibras introduzidas, bem como o aspeto da amassadura no momento de introdução das mesmas.

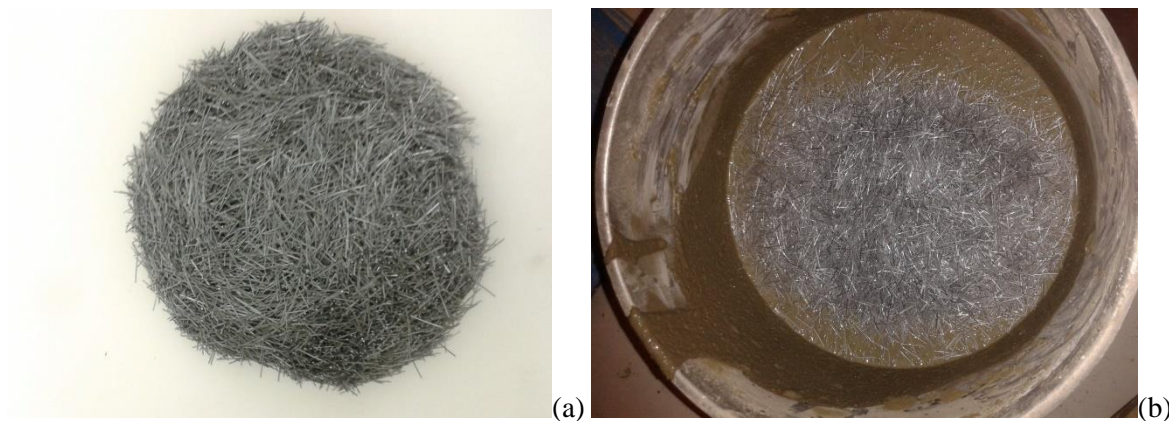


Fig.3.27 a) aspeto das fibras utilizadas; b) argamassa no momento de introdução das fibras

Como foi visto atrás, nesta fase do estudo apenas vai ser utilizada uma mistura, que neste caso será a mistura 1, com diferentes dosagens de fibras. Serão somente utilizadas um tipo de fibras com comprimento de 12,5 mm e Ø0,4. As percentagens de fibras estudadas serão de 1,5%, 2,25%, 3%. Simultaneamente à introdução de uma percentagem de fibras, é retirada a mesma percentagem de areia, mantendo assim o volume.



De seguida, no Quadro 15, apresentam-se as composições estudadas para as diferentes percentagens de fibras. Porém, e como já tinha sido referido no ponto anterior onde se estudaram argamassas sem fibras, a misturadora utilizada nesta fase tem uma capacidade reduzida. Desta forma as composições foram reduzidas proporcionalmente para perfazerem um volume de 1,4L.

### 3.5.2 CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO FRESCO

Após cada amassadura, e como também já foi explicado no ponto 3.4, realizaram-se os ensaios de espalhamento para se fazer a caracterização do estado fresco de cada amassadura, com vista a garantir que, com a introdução das fibras, as propriedades autocompactáveis do material se mantinham.

Com Fig.3.28 é possível ter uma ideia do aspeto da argamassa após a introdução das fibras. Para todas as quantidades o aspecto da mesma não se alterou significativamente, não se notando aglomerados de fibras, o que poderia significar que a dosagem não era suportada pela argamassa. Neste caso não se observou qualquer tipo de segregação, e a argamassa aparentava uma boa reação à introdução das três dosagens de fibras.

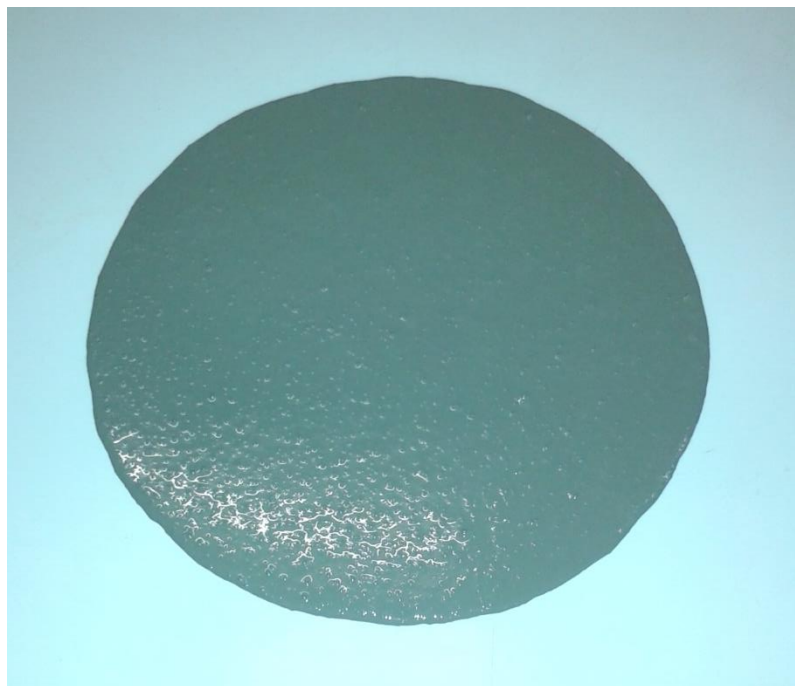


Fig.3.28 Aspeto da argamassa n final do ensaio de espalhamento.

Quadro 15 Composições da mistura para cada percentagem de fibras

Material	Massa volúmica (Kg/m <sup>3</sup> )	Teor de sólidos	Quantidade (kg/m <sup>3</sup> )			
			0%	1,50%	2,25%	3%
Cimento CEM I 42.5 R	3160		548,625	548,63	548,63	548,63
Metacaulino	2200		182,875	182,88	182,88	182,88
Filer calcário	2680		313,5	313,50	313,50	313,50
Areia fina	2630		1019,862	980,412	960,687	940,962
Água	1000		205	205,00	205,00	205,00
Superplastificante	1080	40%	19,855	19,86	19,86	19,86
Fibras	7850		0	117,75	176,625	235,5

Os resultados do ensaio de espalhamento estão evidenciados no Quadro 16.

Quadro 16 Resultados do ensaio de espalhamento, para as três percentagens de fibras ensaiadas

% de fibras	0%	1,50%	2,25%	3%
Desp (mm)	304	292	281	276
	306	295	287	280
média (mm)	305	293,5	284	278

A partir da análise dos resultados apresentados, conclui-se que as propriedades auto-compactáveis do material se mantêm, com valores de espalhamento próximos dos 300mm (valor desejável). Como já era de prever, o espalhamento foi reduzindo à medida que se aumenta a percentagem de fibras.

### 3.5.3 CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO ENDURECIDO

Para a análise do comportamento no estado endurecido para os 7 dias foi utilizado o Double Edge Wedge Splitting (DEWS). Este é um teste que se realiza por meio de um estado de tensão de tração induzida indirectamente através da aplicação de uma carga de compressão, mas mantendo sempre a tração transversal desacoplada da compressão longitudinal. Na Fig 3.29 pode ver-se como são aplicadas as forças para a realização do teste.

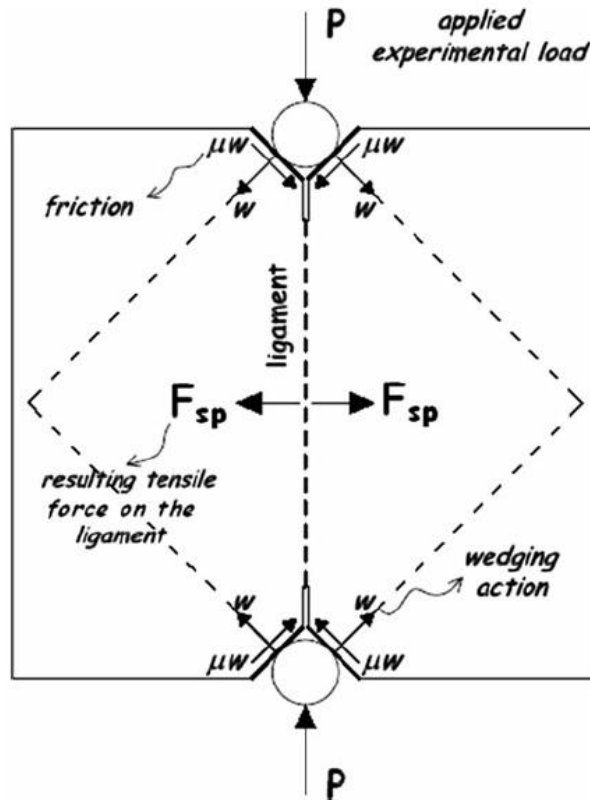


Fig.3. 29 – Desenho esquemático da aplicação de forças no provete durante o ensaio DEWS [26]

Como também se pode constatar na Fig.3.29, foram efetuadas duas reentrâncias a 45° de inclinação, onde serão acomodados os roletes que permitem a transmissão das cargas. Nestas reentrâncias são colocadas pequenas placas metálicas lubrificadas com grafite, com um valor de coeficiente de atrito já conhecido.

Para a realização deste ensaio foram instalados 3 LVDT's ("Linear Voltage Diferencial Transducer") nas duas faces do provete, sendo, a partir deles, medida a abertura da fenda central com a variação da carga aplicada.[1] O funcionamento mais pormenorizado destes dispositivos está descrito no capítulo 2 da presente dissertação.

Foram testados, para cada dosagem de fibras, dois provetes perfazendo, portanto, um total de seis. Cada par foi gerado a partir de uma mesma placa cortada ao meio, sendo que, desta forma, a composição dos provetes é similar entre si. Depois de cortadas as placas ao meio, os provetes ficaram com uma forma geométrica quadrada de 150mm de lado e cerca de 25mm de espessura, sendo que esta não é uma constante, pois de um provete para outro notam-se variações ligeiras associados a pequenos erros de betonagem.

A prensa utilizada está ligada a programa que nos fornece vários dados. Entre eles encontra-se profundidade da fenda e a força de pico. A partir destes e com o conhecimento prévio da espessura do provete consegue estima-se a resistência à tração a partir da fórmula (4).

$$f_t = \frac{0,89 \times F_f \times 10^{-3}}{p \times 10^{-3} \times e \times 10^{-3}} \text{ MPa} \quad (4)$$

Em que:

Ff- força aplicada (KN);

e- espessura do provete

ft – Resistência à tração (MPa)

p- desenvolvimento da fenda (mm)

Na Fig.3.30 pode ver-se todo o sistema de LVDT's instalado, bem como os roletes colocados de forma correcta minimizando o atrito.



Fig.3. 30 – Provette preparado para iniciar o ensaio DEWS

Na Fig.3.31 é possível observar a evolução da fenda ao longo do ensaio. Inicialment abrem-se várias pequenas fendas que depois vão unir-se, originando uma única de maiores dimensões.

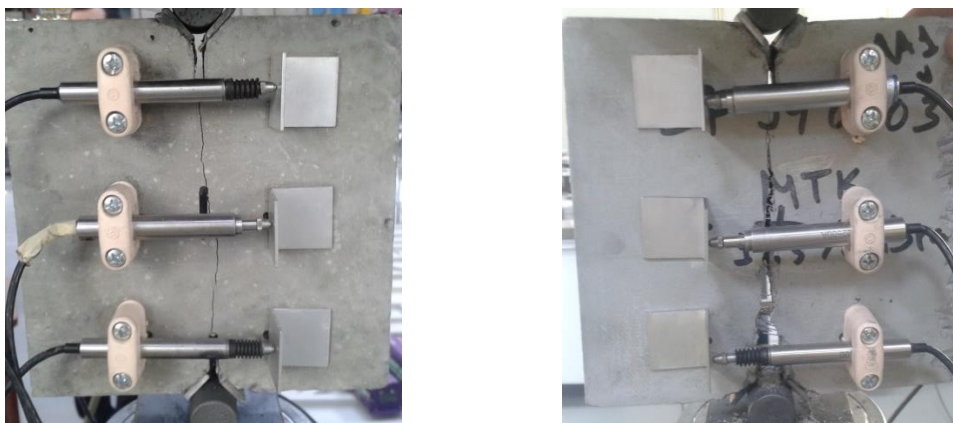


Fig.3. 31 Evolução da fenda ao longo do ensaio DEWS

No quadro 17 apresentam-se os resultados do ensaio DEWST para os seis provetes. Consideram-se os resultados obtidos como sendo a média entre os dois LVDT's do meio, que nos permite ter um resultado médio entre todos os LVDT's.

Quadro 17 – Resultados do ensaio DEWS para os seis provetes

% fibras	Provete	Desenvolvimento da fenda – p (mm)	Espessura - e (mm)	Carga de pico - f (kN)	Resistência à tração (MPa)	Resistência à tração média (MPa)
1,50%	A	96,86	25,6	5,4	1,94	2,23
1,50%	B	96,41	25,2	6,8	2,51	
2,25%	C	99,43	26,2	14,2	4,87	4,31
2,25%	D	98,5	24,7	10,3	3,75	
3,00%	E	98,03	25,1	9,0	3,28	3,56
3,00%	F	98,23	24,9	10,5	3,83	

Para uma melhor percepção dos resultados, o gráfico da Fig.3.32 evidencia a relação entre a percentagem de fibras e a tensão de pico.

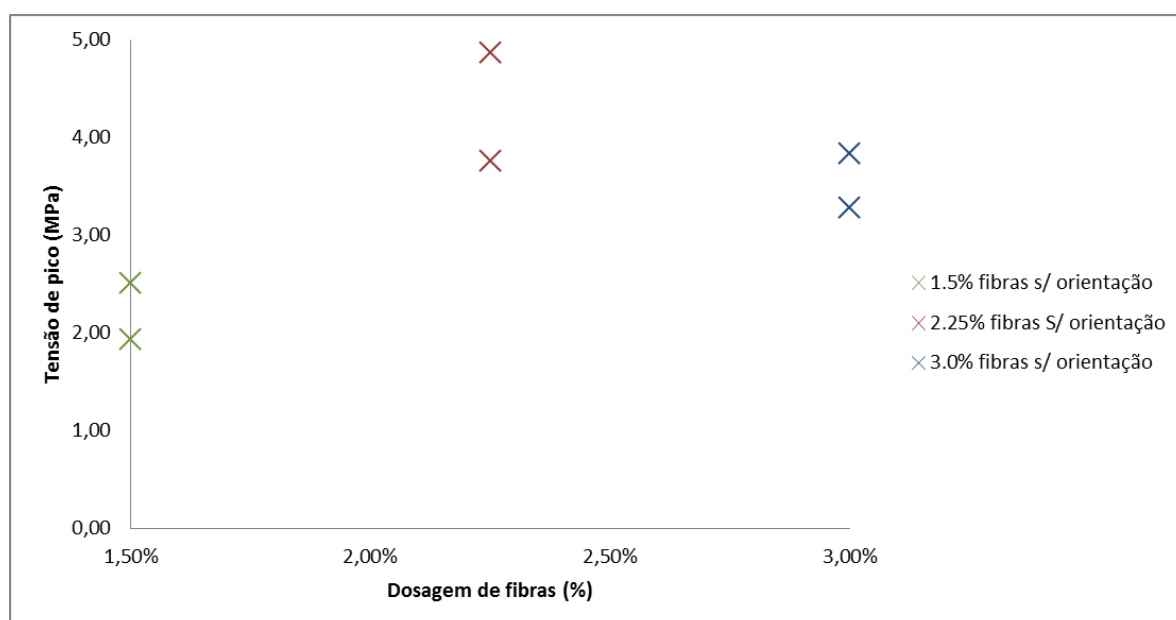


Fig.3. 32 – Gráfico que evidencia relação entre a tensão de pico e a dosagem de fibras

Pela análise do gráfico da figura 3.32 percebe-se que a dosagem que provoca uma alteração mais positiva no desempenho mecânico do material será a de 2,25%, sendo a resistência à tração maior para estes provetes comparativamente com os restantes quatro. Estes resultados podem também ser influenciados pela orientação das fibras, por isso é realizado um estudo da permeabilidade magnética no capítulo seguinte.

No gráfico da figura 3.33 faz-se a relação entre a abertura da fenda com a resistência à tração.

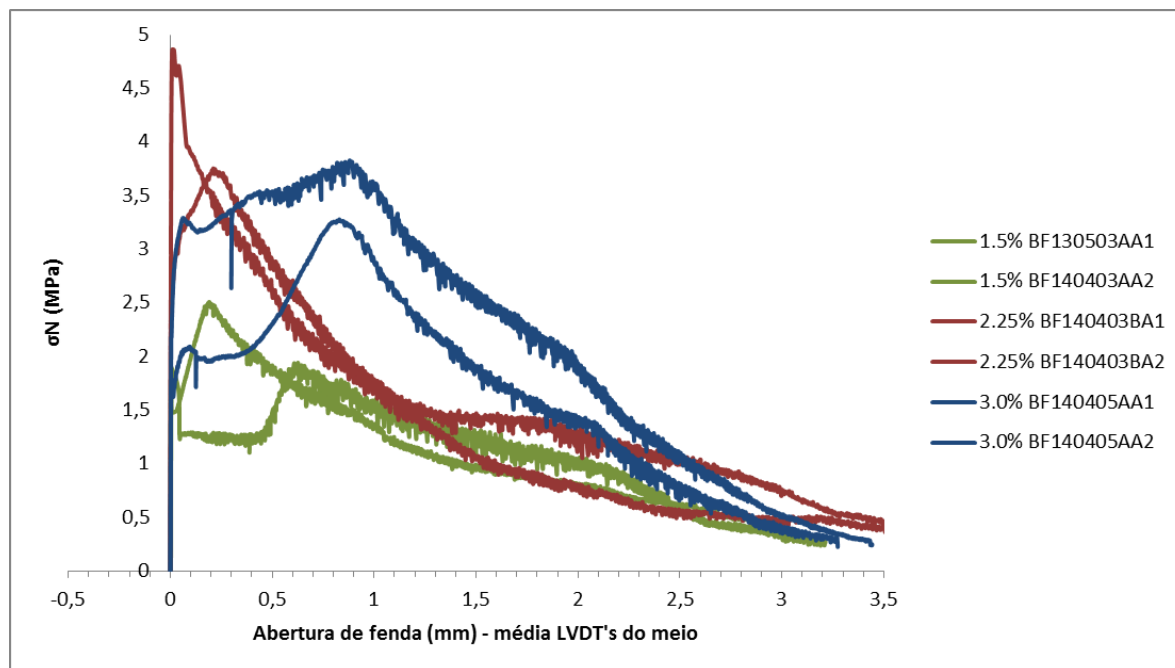


Fig.3. 33 – Gráfico que evidencia relação entre a abertura da fenda e a resistência à tração

Como se pode inferir pela análise do gráfico à medida que a fenda vai aumentando, a resistência à tração da peça vai diminuindo. Podem verificar-se também oscilações nas linhas do gráfico, isto deve-se ao facto de em cada peça existirem várias fibras, que vão sendo mobilizadas à medida que outras deixam de resistir.

### 3.5.3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE BEDRF COM METACAUPLINO E COM OUTROS MATERIAIS

Em trabalhos anteriores ao presente, como foi referido no capítulo 2, ao invés da utilização do metacaulino, foi usada a sílica de fumo como adição na composição do betão de elevada resistência reforçado com fibras. Para além destes, continuam a ser estudados outros materiais que permitam melhorar as características mecânicas, de durabilidade e que o tornem mais atractivo a nível económico para as empresas. É nesta medida, que paralelamente a este trabalho se desenvolvem outros, no âmbito deste projecto, que têm em vista o estudo do BEDRF com introdução do pó de vidro como adição.

Para que se perceba duma forma geral quais as alterações verificadas com a alteração do tipo de adição, vão mostrar-se, de seguida, alguns resultados obtidos para outros materiais, cruzando-os com os resultados obtidos durante esta dissertação, permitindo assim obter algumas conclusões acerca do que poderão ser as vantagens ou desvantagens da utilização do metacaulino. A composição incorporando metacaulino foi já apresentada anteriormente, contudo apresenta-se de seguida a composição incorporando pó-de-vidro e sílica de fumo (composição de referência), utilizada para esta análise comparativa nos quadros 18 e 19, respetivamente.

Quadro 18 Composição incorporando pó-de-vidro

Pó de vidro					
Material	Massa volúmica	Quantidade (kg/m3)			
		0%	1,5%	2,25%	3%
CEM I 42.5 R	3160	548,62	548,62	548,62	548,62
Pó de vidro	2390	173,25	173,25	173,25	173,25
Filer calcário	2680	433,12	433,12	433,12	433,12
Areia fina	2630	1019,86	980,41	960,68	940,96
Água	1000	165,00	165,00	165,00	165,00
Superplastificante	1080	18,48	18,48	18,48	18,48
Fibras	7850	0,00	117,75	176,62	235,5

Quadro 19 Composição de referência incorporando sílica de fumo

Sílica de fumo					
Material	Massa volúmica	Quantidade (kg/m3)			
		0%	1,5%	2,25%	3%
CEM I 42.5 R	3160	794,9	794,9	794,9	794,9
Sílica de fumo	1380	79,49	79,49	79,49	79,49
Filer calcário	2680	311,43	311,43	311,43	311,43
Areia fina	2630	1019,862	980,412	960,687	940,962
Água	1000	153,76	153,76	153,76	153,76
Superplastificante	1080	13,7529	13,7529	13,7529	13,7529
Fibras	7850	0	117,75	176,625	235,5

Em primeiro lugar fez-se uma análise da trabalhabilidade com os diferentes materiais no estado fresco. Pelo gráfico da Fig.3.34 observa-se o comportamento no ensaio de espalhamento para diferentes factores de forma das fibras introduzidas em betões com composições diferentes, sendo que uma tem metacaulino, outra sílica de fumo e uma terceira com pó de vidro.

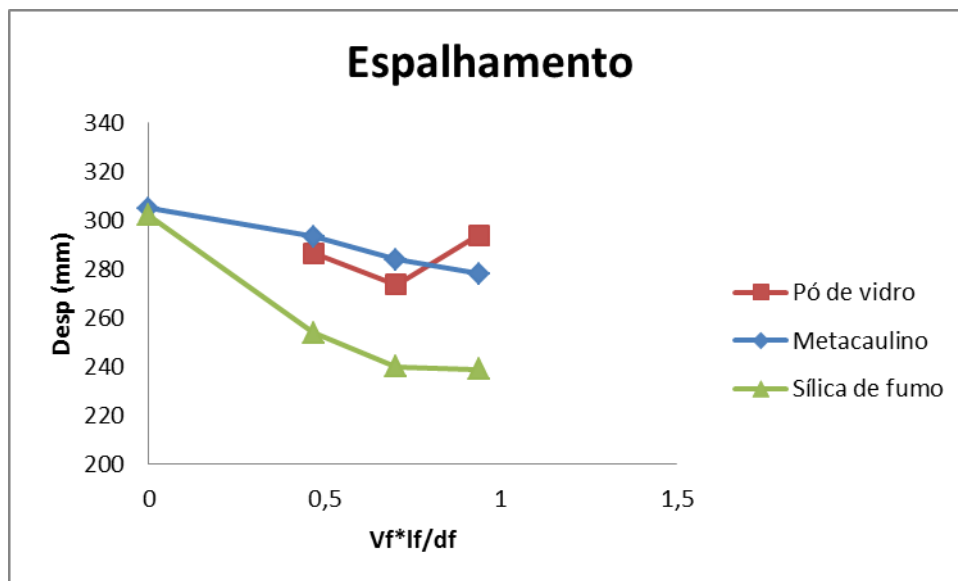


Fig.3. 34 – Gráfico comparativo do decréscimo da trabalhabilidade com o aumento de fibras

Como se pode observar no gráfico, com o aumento do fator de forma, há um decréscimo do espalhamento. Esta diminuição é mais acentuada no caso da sílica de fumo. No caso do p-de-vidro ocorre um aumento do espalhamento quando se aumenta a percentagem de fibras. Isto indica que é possível introduzir uma maior percentagem de fibras na composição com pó-de-vidro, o que poderá, eventualmente, levar a incrementos nas capacidades mecânicas deste material. A mistura com o metacaulino apresenta uma redução quase linear da trabalhabilidade.

Ao nível das características mecânicas compararam-se os resultados obtidos para a resistência à tração dos vários materiais.

Nas Fig.3.35 e Fig.3.36 observam-se os resultados das tensões de pico do ensaio DEWS para as diferentes dosagens de fibras na composição com pó-de-vidro e sílica de fumo, respectivamente.

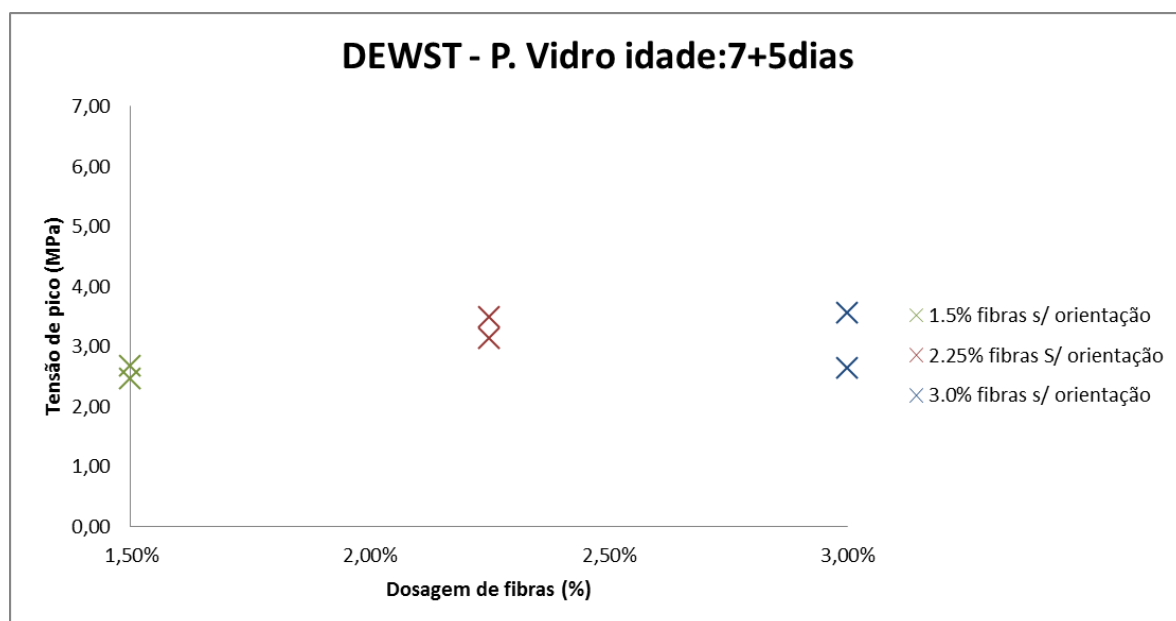


Fig.3. 35 Gráfico representativo dos resultados do ensaio DEWST para a composição com pó-de-vidro.



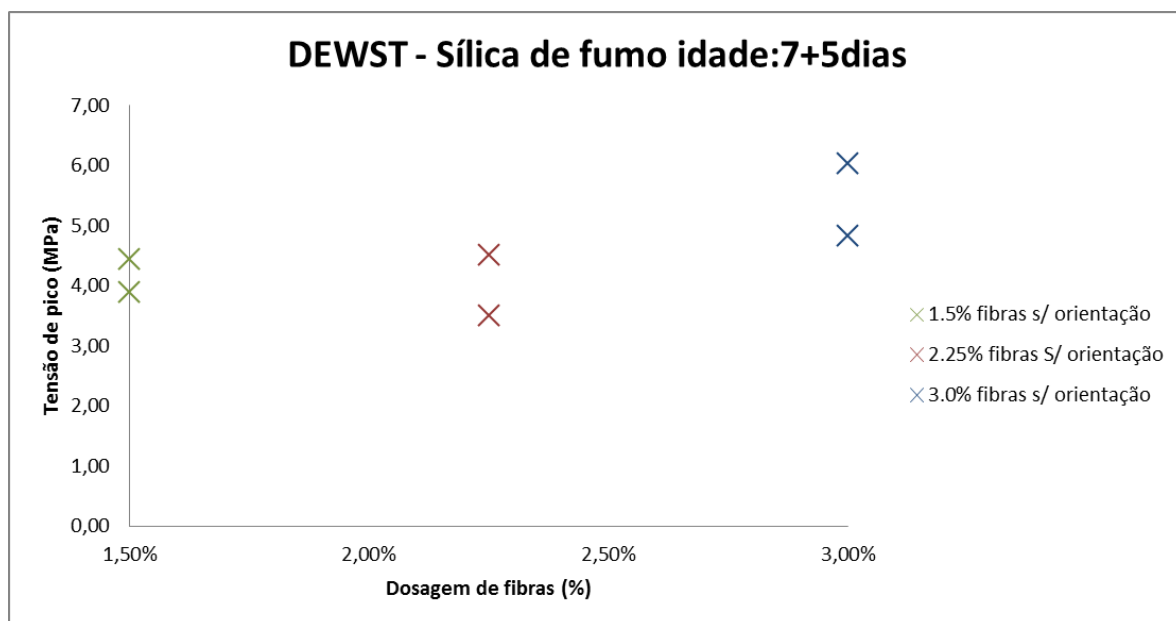


Fig.3. 36 Gráfico representativo dos resultados do ensaio DEWS para a composição com sílica de fumo

Como se pode verificar não se observa uma evolução clara da resistência com a introdução das fibras, o que pode ser consequência da ausência de orientação das fibras. Analisando os provetes com a mesma percentagem de fibras, notam-se valores de resistência à tração diferentes, o que evidencia a diferente disposição das fibras dentro de cada provete.

No caso da composição com sílica de fumo, é mais evidente o aumento da resistência com o aumento da dosagem de fibras.



# 4

## Caracterização da composição estudada

### 4.1 INTRODUÇÃO

Depois de selecionada a composição a partir do estudo apresentado no capítulo anterior com e sem fibras, passou-se para o estudo da mesma composição (com uma dosagem de 3% de fibras), mas agora para um volume maior. Este aumento de volume é interessante uma vez que permite elaborar um conjunto de ensaios pertinentes no âmbito do projecto em que se insere este trabalho, estudando os efeitos do metacaulino nas propriedades mecânicas e na durabilidade do betão. Para além disso, permite também o estudo da influência de diferentes tipos de orientação de fibras, bem como a comparação com a composição de referência, permitindo analisar o comportamento do betão em dosagens próximas de situações reais. Nesta fase do trabalho são também introduzidos ensaios de permeabilidade magnética que permitem perceber qual a orientação e distribuição das fibras nos provetes em estudo.

### 4.2 PROCEDIMENTO DE AMASSADURA

O procedimento de amassadura seguido nesta fase e esquematizado na Fig.4.1 é em tudo semelhante ao que já foi utilizado em processos de amassadura anteriores, no entanto a velocidade de rotação das pás é superior à que anteriormente se utilizava, uma vez que foi utilizada uma misturadora de maiores dimensões e características mecânicas totalmente diferentes como se pode ver na Fig.4.2.

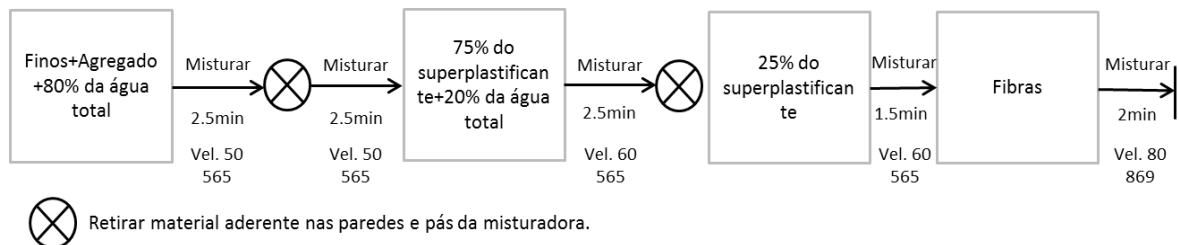


Fig.4. 1 Esquema do procedimento experimental utilizado na amassadura do betão



Fig.4. 2 Misturadora zyklos utilizada nas amassaduras do BEDRF

Nesta fase foram feitas quatro amassaduras, sendo que duas delas foram utilizadas como composições de referência, em que se usou sílica de fumo com e sem introdução de fibras. As outras duas correspondem a amassaduras com metacaulino com e sem introdução de fibras.

Na Fig.4.3 podem ver-se as diferentes fases do processo de amassadura.



a)



b)

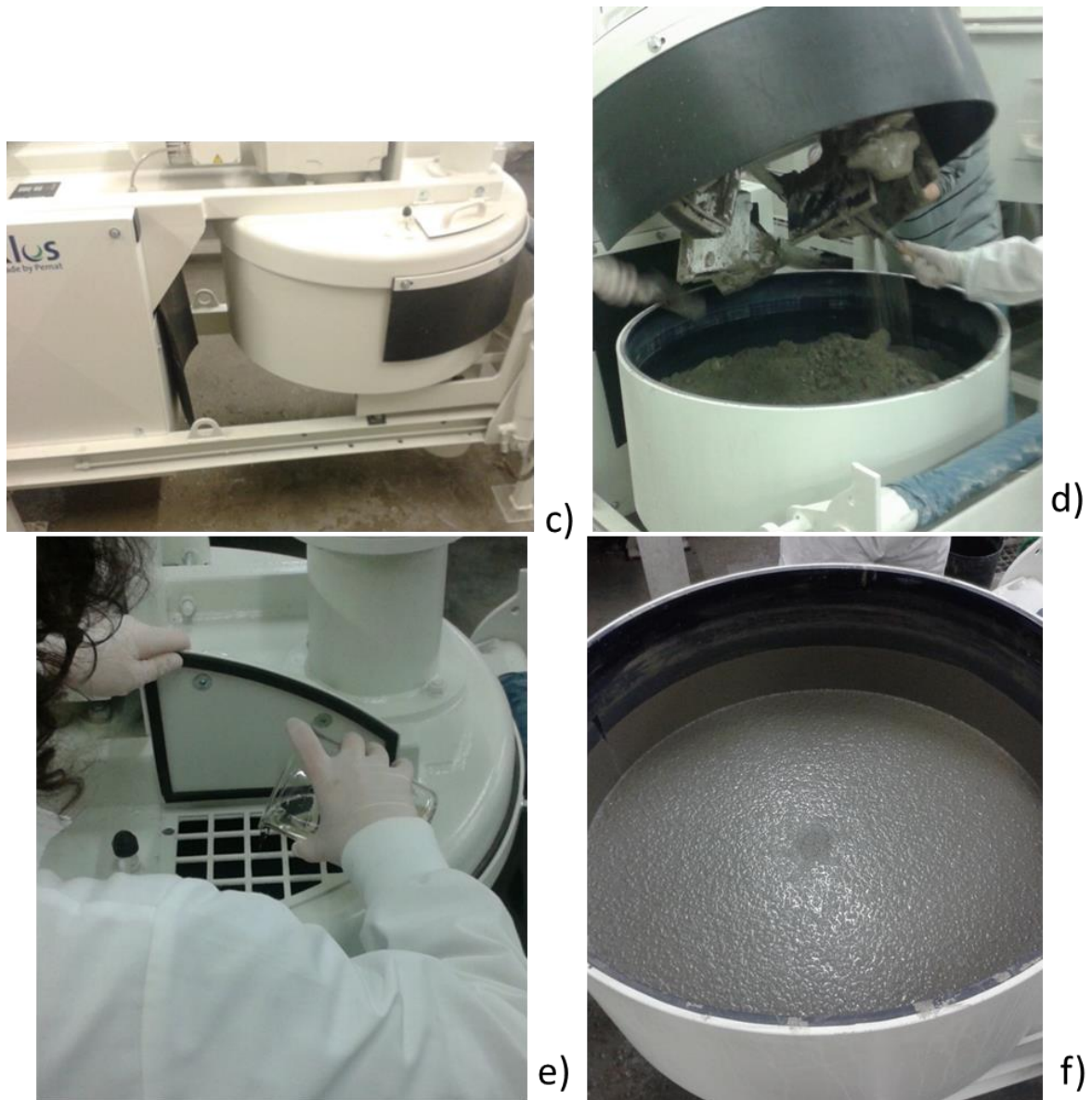


Fig.4. 3 Processo de amassadura do betão: (a) Conjunto de provetes a serem betonados para ensaios posteriores; (b) Introdução dos finos, agregado, água e sílica de fumo na misturadora; (c) Misturadora em fase de mistura; (d) Processo intermédio de raspagem das pás para que não fique material acumulado; (e) Introdução do superplastificante, (f) Aspeto final do betão

#### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Como já foi descrito em capítulos anteriores, para o estudo no estado endurecido da resistência à tração foi utilizado o ensaio DEWS aos 7, 14 e 28 dias. Foram betonadas 5 placas de dimensões  $304 \times 150 \times 25 \text{ mm}^3$  que depois de cortadas originaram 10 provetes de ensaio. Pretende-se, com o ensaio da resistência à tração em diferentes idades, perceber a evolução do comportamento deste material com a idade, compreendendo a mais-valia ou não da sua utilização. Nesta fase dividiu-se o estudo em duas partes, analisando-se o comportamento do material com e sem a orientação das fibras. No capítulo 2 foi evidenciada a importância da orientação das fibras e como este fator pode interferir nas capacidades mecânicas deste betão. Como também já foi evidenciado anteriormente, é fundamental garantir que não ocorra a segregação. Pelo que se pôde constatar tal não ocorreu e as fibras

distribuíram-se de forma mais ou menos uniforme pela espessura provete como se pode comprovar na Fig.4.4. No anexo A1 podem ver-se as imagens de todos os provetes estudados, comprovando a distribuição homogênea das fibras.

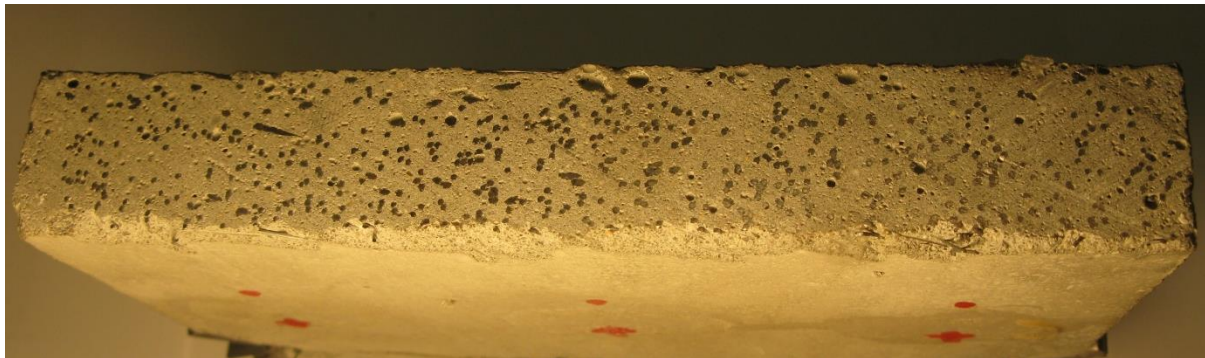


Fig.4. 4 Distribuição mais ou menos uniforme das fibras na espessura da placa

#### 4.3.1 RESULTADOS DO ENSAIO DEWS PARA DIFERENTES IDADES SEM ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS

Para a composição com metacaulino e com 3% de fibras, obteve-se o gráfico da Fig.4.5 que evidencia a relação entre a resistência à tração e a abertura da fenda para as três idades estudadas.

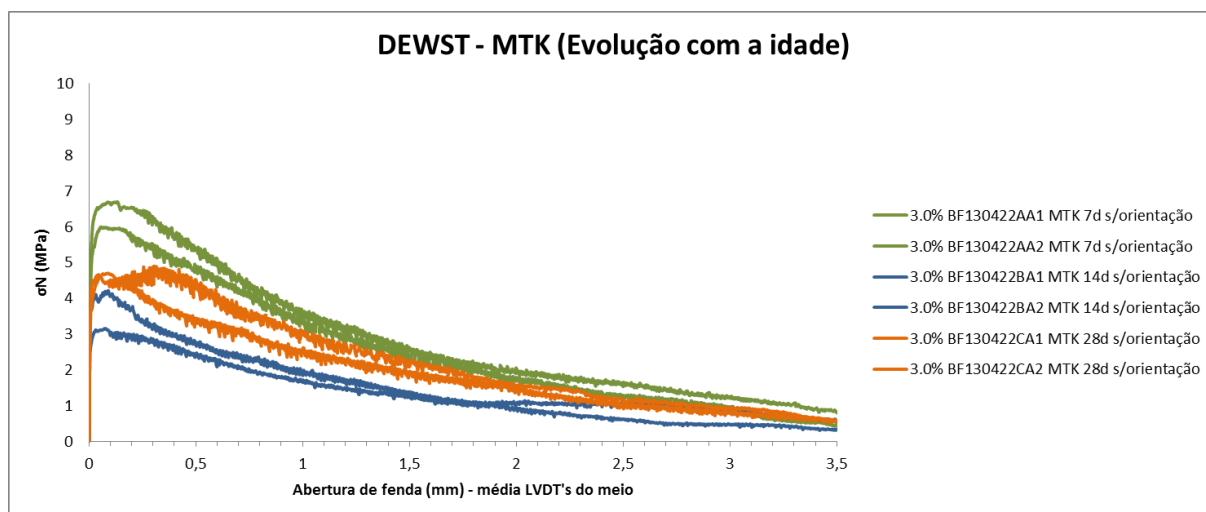


Fig.4. 5 Gráfico resultante do ensaio DEWS que relaciona a tensão com a abertura da fenda para a composição do metacaulino com 3% de fibras sem orientação

Como se pode ver, sem a orientação das fibras, não há melhorias ao nível da resistência à tração com a idade. No gráfico da Fig.4.6 essa falta de evolução é ainda mais notória. Nele estão apenas representadas as tensões de pico para os 7, 14 e 28 dias e o que se percebe é uma diminuição da resistência para os 14 dias e uma ligeira subida, nada significativa, para os 28 dias.



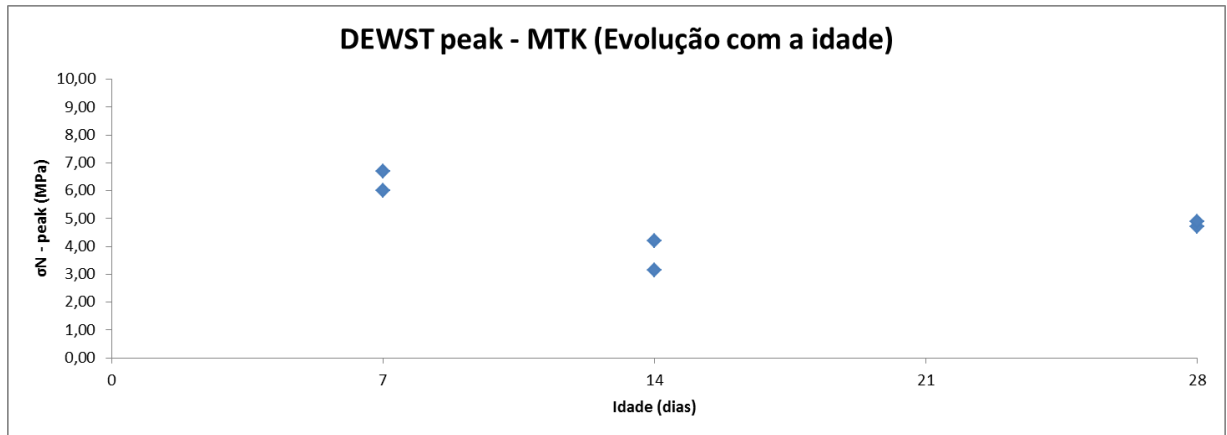


Fig.4. 6 Gráfico representativo da evolução da resistência à tração com a idade sem orientação das fibras

#### 4.3.2 INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS NOS ENSAIOS DEWS

Como foi evidenciado no segundo capítulo, a orientação das fibras é um fator determinante para o melhor comportamento do BEDRF. Sabe-se que para uma orientação perpendicular à acção da força, a resistência à tração é melhorada. Neste processo de orientação, foram testados dois métodos diferentes. Posteriormente realizaram-se os ensaios DEWS apenas para a idade de 28 dias, com o objectivo de perceber as alterações provocadas pela orientação, bem como evidenciar a influência dos métodos de orientação nas propriedades mecânicas do material.

No primeiro recorreu-se a um electroíman, tirando partido das características electromagnéticas do aço para orientar as fibras. No âmbito do projecto em que se insere este trabalho, tinha já sido desenvolvido um atuador electromagnético capaz de estabelecer um campo magnético suficientemente forte para orientar as fibras no processo de betonagem. Na Fig.4.7 pode ver-se o electroíman utilizado, constituído por um núcleo de ferro em forma de “U” no qual se enrolaram duas bobinas de cobre, de tal modo que o campo magnético induzido possuísse como polos norte e sul cada uma das pernas do “U”. [5] Este mecanismo é ainda constituído por uma bateria de 12V e um reóstato que permitia o controlo da intensidade de corrente.

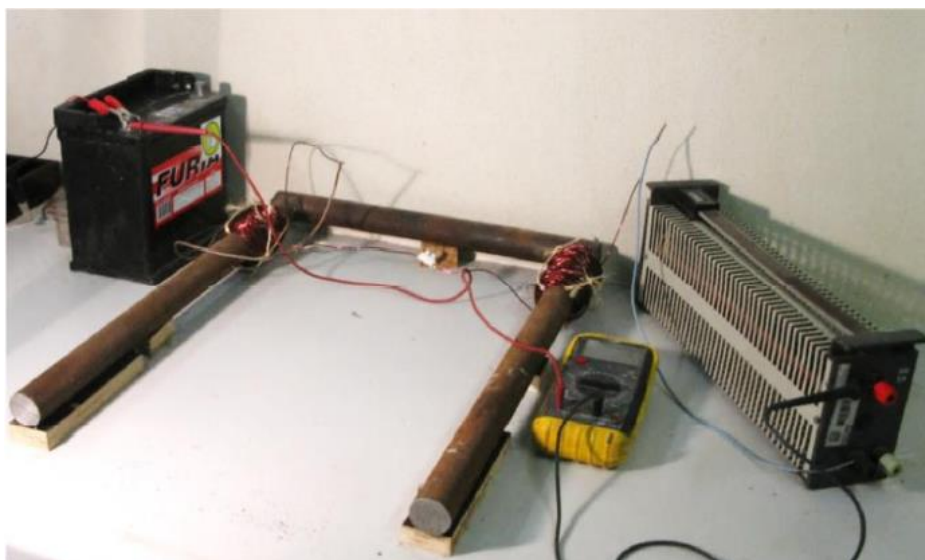


Fig.4. 7 Electroíman em “U”

No segundo método procurou-se orientar as fibras, tirando partido do fluxo do de escoamento e da posição do molde. Foi para isso elaborado um esquema de betonagem constituído por um funil, bem como um tubo direccional do fluxo que depositava, por fim o betão na placa a betonar. O método está esquematizado na Fig.4.8.

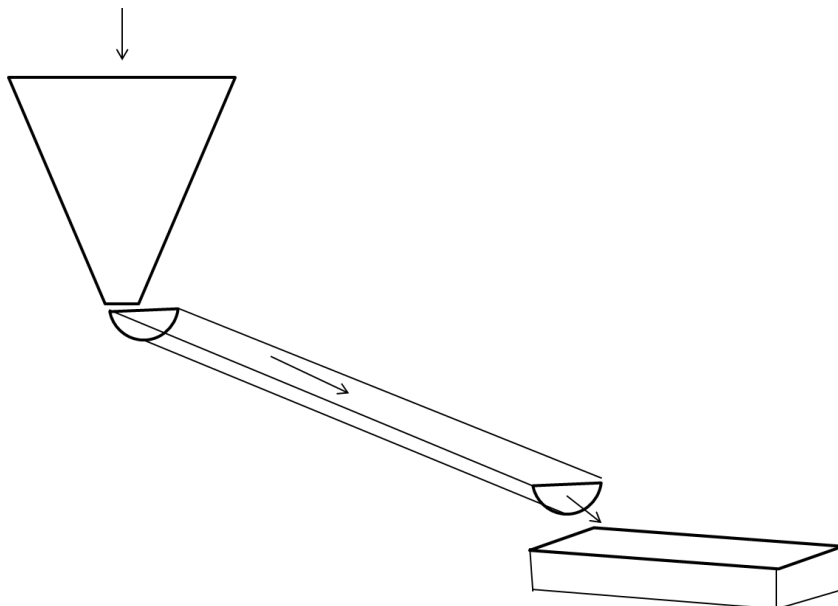


Fig.4. 8 Representação esquemática do método de orientação por fluxo

Pelos dois métodos utilizados de orientação, obtiveram-se os resultados de resistência à tração representados no gráfico da Fig.4.9.

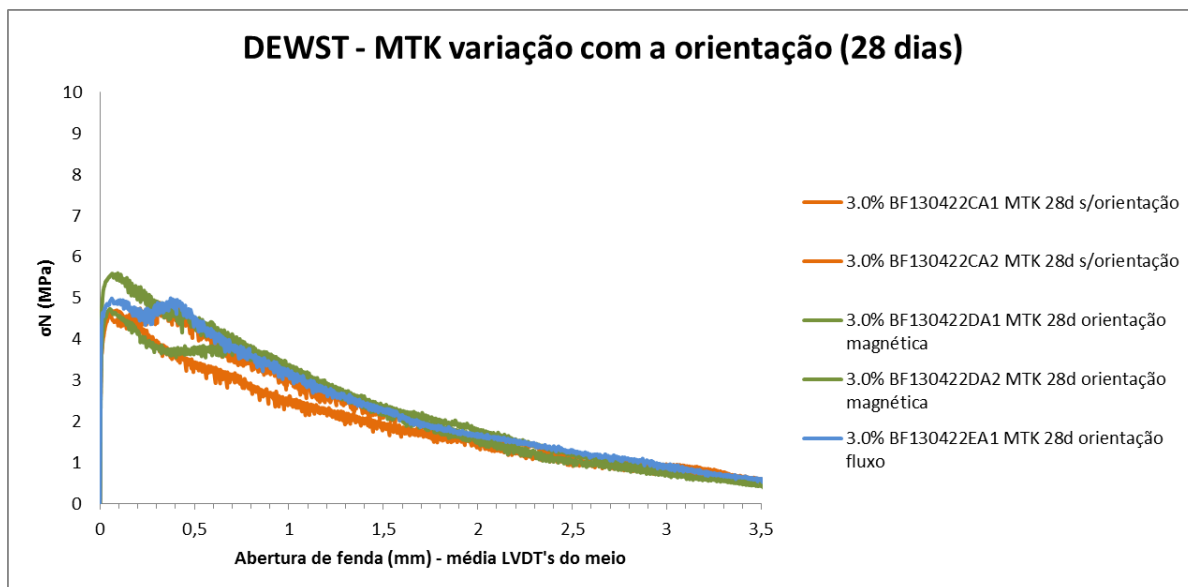


Fig.4. 9 Gráfico representativo dos resultados do ensaio DEWS para provetes com fibras orientadas

Pelo que se pode observar, comparando com os ensaios anteriores, não se verificou uma evolução significativa com a orientação das fibras. Para os 28 dias, nos provetes sem orientação, a resistência à tração ronda os 4,8 MPa e para os provetes com orientação magnética o mesmo parâmetro ronda os 5 MPa. Com o método do fluxo, a resistência à tração é de 5,5 Mpa. Embora sejam valores mais



elevados, não evidenciam vantagens significativas. Estes resultados podem ser fruto da utilização de fibras mais de maiores dimensões e consequentemente mais pesadas, o que pode ter levado à falha do método de orientação magnética. As dimensões elevadas das fibras associadas à viscosidade da composição incorporando metacaulino, podem dificultar o efeito magnético e consequentemente a orientação das fibras.

#### 4.4 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A MATRIZ ESTUDADA E A COMPOSIÇÃO DE REFERÊNCIA

Neste ponto pretende fazer-se uma análise comparativa entre os resultados obtidos com o metacaulino e a composição de referência já utilizada no capítulo anterior com a sílica de fumo.

Para uma mesma dosagem de fibras, os resultados do ensaio DEWS podem ser vistos no gráfico da Fig.4.10, bem como as tensões de pico para cada uma das idades no gráfico da Fig.4.11.

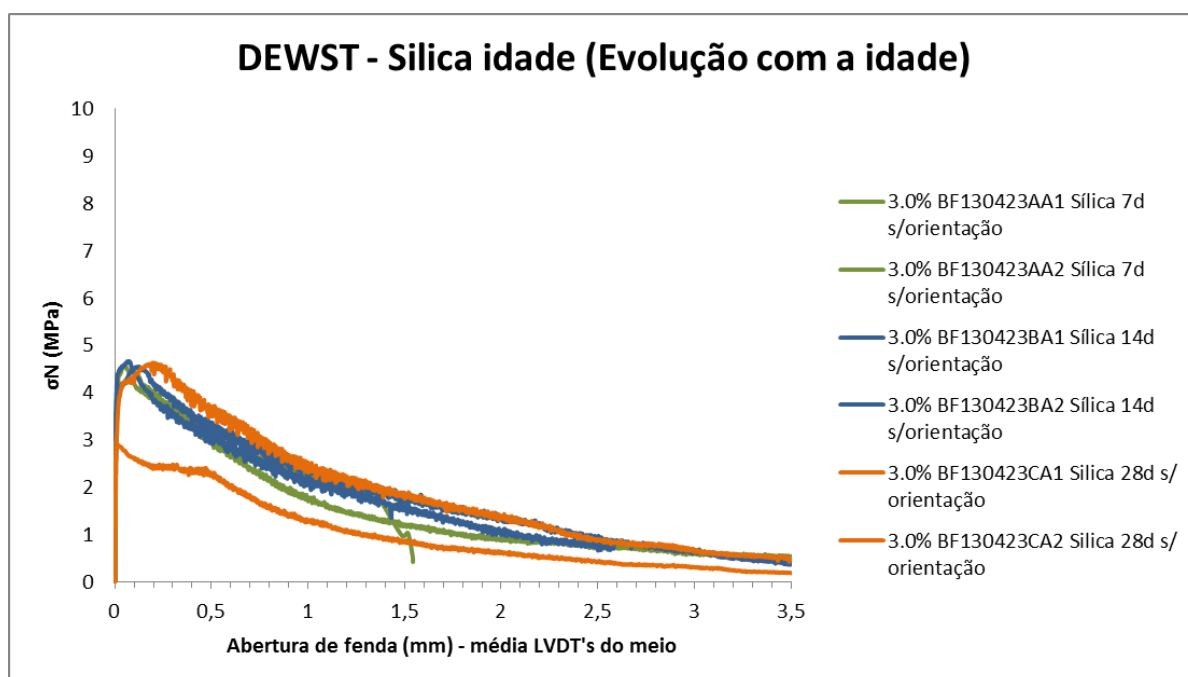


Fig.4. 10 Gráfico representativo do ensaio DEWS para a composição de referência com sílica de fumo

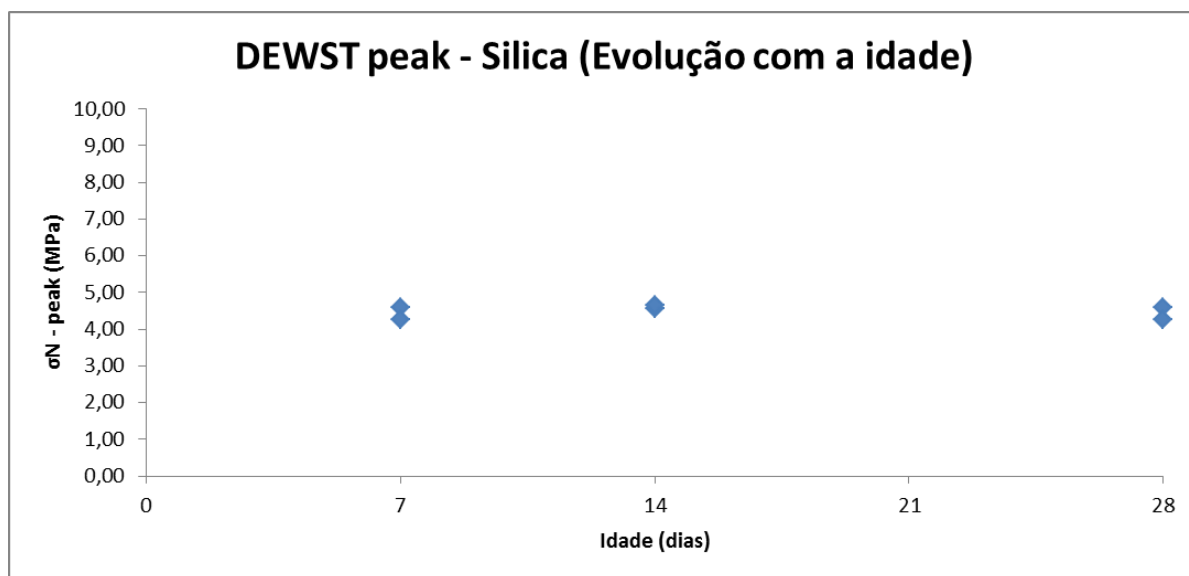


Fig.4. 11 Gráfico representativo da evolução das tensões de pico com a idade

Como se pode observar, nestes primeiros provetes em que não foi utilizada nenhum tipo de orientação, não ocorreu a mesma regressão que ocorre no caso do metacaulino aos 14 dias. Aqui a resistência à tração mantém-se relativamente constante ao longo do tempo. No entanto, e se se comparar com resultados obtidos no âmbito do projecto em que se utilizaram fibras diferentes, nomeadamente 1,5% de 9mm+ 1,5% de 12mm, os resultados mostram-se aquém dos obtidos anteriormente.

No caso em que foi forçada a orientação das fibras, e tendo em conta que aqui apenas podemos comparar a orientação magnética, visto que a orientação pelo fluxo não foi realizada, os resultados obtidos podem ser analisados na Fig.4.12.

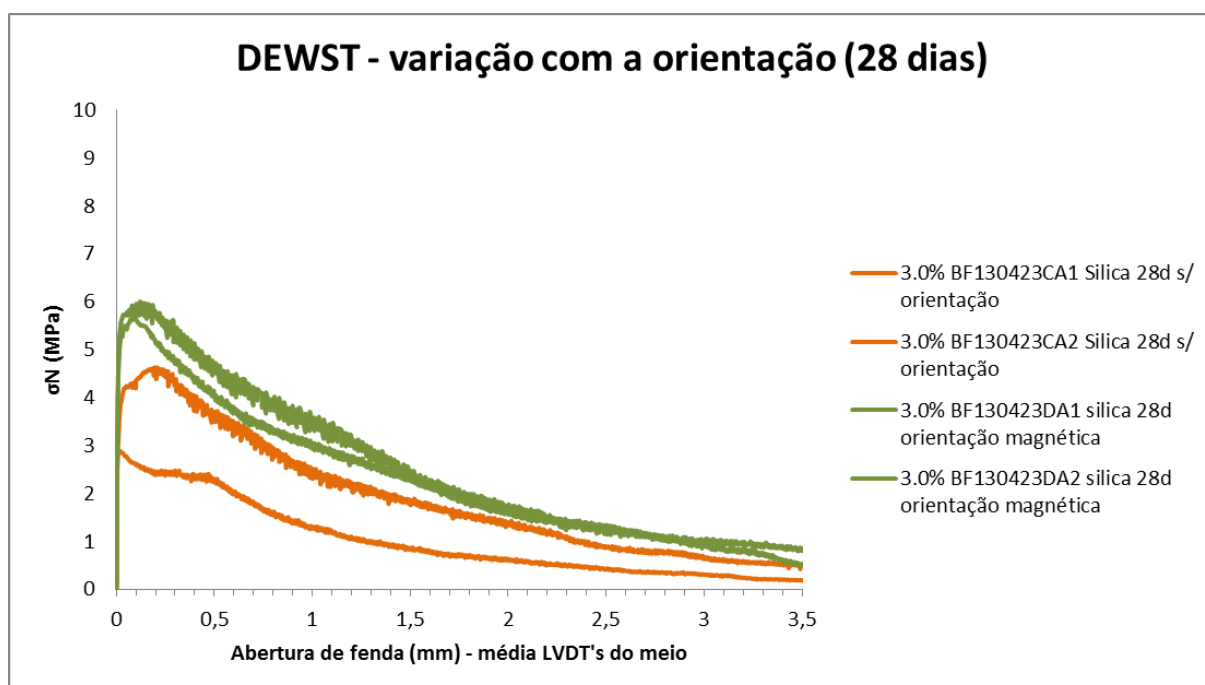


Fig.4. 12 Gráfico representativo dos resultados do ensaio DEWS para provetes com as fibras orientadas e composição de referência

Neste caso, há um aumento mais notório da resistência, com a orientação das fibras, passando de valores de 4,63MPa e 2,9MPa para valores de tensão de 5,67MPa e 6MPa. O valor de 2,9MPa, pode ser justificado uma vez que analisando as imagens do Anexo A1 (BF130423CA2) do provete a que se refere este resultado, verifica-se que houve aqui uma menor concentração de fibras, sendo que estas se acumularam mais do lado contrário. Este facto pode ter originado uma quebra de resistência neste provete. Contudo, e mais uma vez, os resultados ficam aquém dos obtidos anteriormente com outro tipo de fibras. Na quadro 20 podem ver-se os valores mais precisos das tensões de pico dos vários materiais testados.

Quadro 20 Resultados das tensões de pico para diferentes composições aos 28 dias

Tensão de pico - variação com a orientação (28 dias) (MPa)			
	Sem orientação	Orientação magnética	Orientação fluxo
MTK	4,80	5,17	5,54
Silica	3,76	5,84	S/ resultados
Betofibra - silica 3% de fibras (9+12 mm)	6,54	18,37	S/ resultados

Pela análise dos valores do quadro verifica-se uma diferença acentuada nos valores alcançados, principalmente no que refere à orientação das fibras. Apesar de se verificar um ligeiro aumento das tensões de pico quando as fibras são orientadas, não é comparável com a evolução observada para a composição estudada no âmbito do projecto Betofibra [5](9mm+12mm) cujos valores de resistência à tração alcançam os 18,37MPa com as fibras orientadas a 0°. Estes resultados evidenciam de forma clara que a matriz cimentícia pouco interfere nos resultados à tração. Com o aumento da idade, é sabido que a matriz vai ganhando resistência, no entanto são as fibras que dominam o comportamento, já que a sua alteração provoca evoluções significativas na resistência mecânica à tração dos provetes. A variação significativa dos resultados obtidos neste trabalho face aos resultados obtidos na Betofibra [5] são justificados pela diferença de fibras utilizadas. Neste trabalho utilizam-se fibras de 12,5mm, com um diâmetro superior de 0,4mm e uma resistência à tração inferior como se pode ver no capítulo 3 quando se apresenta a caracterização das fibras.

#### 4.5 ENSAIOS DE PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

Os materiais que contêm ferro, níquel e cobalto são fortemente atraídos entre si quando são magnetizados. Estes materiais denominam-se de ferromagnéticos. Outros materiais como por exemplo o betão, são pouco atraídos por campos magnéticos. Estes tipos de material são designados por paramagnéticos. As fibras incorporadas neste material exibem um comportamento ferromagnético. [8]

Lataste et al [32] demonstrou que o método da resistividade magnética deteta a orientação das fibras, sendo, no entanto, incapaz de fornecer informação sobre a concentração de fibras uma vez que a resistividade é influenciada pela presença de fibras e também pelos electrólitos presentes nos poros. Desta forma o efeito da condução das fibras levou ao desenvolvimento de outro método baseado nas propriedades magnéticas das fibras.[2]

O princípio do método baseia-se no facto de que a presença e a posição relativa das fibras no betão reforçado com fibras modificam as linhas do campo magnético provocadas por uma sonda magnética.

No âmbito do projecto em que se insere este trabalho foi desenvolvido um método de medição de permeabilidade magnética que se baseia numa sonda composta por um núcleo de ferrite envolvido por duas bobinas. Essa sonda foi ligada a uma ponte de medida RLC modelo IX 3131 Metrix®, o que permitiu obter valores de indutância para frequências de 1HZ e 120KHZ., como pode ser visto na Fig.4.13.

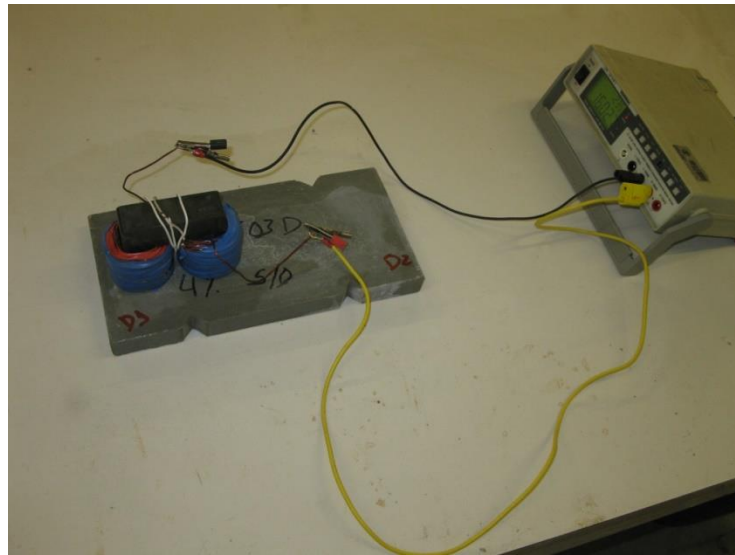


Fig.4. 13 Sonda magnética para medição da permeabilidade

#### 4.5.1 INDUTÂNCIA MAGNÉTICA

A indutância pode ser entendida como a capacidade de uma bobina criar um fluxo magnético. Inserindo o betão no circuito magnético de uma bobine, a medição da sua indutância permite medir indirectamente a permeabilidade magnética do betão, por comparação das indutâncias da bobine e do betão e da bobine e do ar.[2]

A expressão que permite calcular a indutância de um determinado meio material é dada pela equação (5).

$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot \frac{A}{l} \quad (5)$$

Onde L é a indutância,  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo ( $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m),  $\mu_r$  é a permeabilidade magnética do meio em análise, N é o número de espiras, A é a área do núcleo envolvido pelas espiras e l é o comprimento envolvido pelo cabo ao longo das espiras.

Através da sonda construída obtém-se dois valores de indutâncias, nomeadamente a do meio, L1 e a do ar, L2. Sabendo que os valores de N, A, l, são constantes, consegue obter-se a permeabilidade magnética do meio através da equação (6).

$$\mu_{r1} = \frac{L1}{L2} \quad (6)$$

Nesta fase do trabalho pretendia-se avaliar a permeabilidade magnética do conjunto da matriz cimentícia com as fibras metálicas incorporadas, comparando os resultados obtidos entre o material em estudo e a composição de referência. Foi, por isso, medida a permeabilidade em dois sentidos diferentes, a  $0^\circ$  (direcção longitudinal) na direcção perpendicular ao plano de fratura e a  $90^\circ$  (direcção transversal) na direcção paralela ao plano de fratura dos provetes como está esquematizado na Fig.4.14.

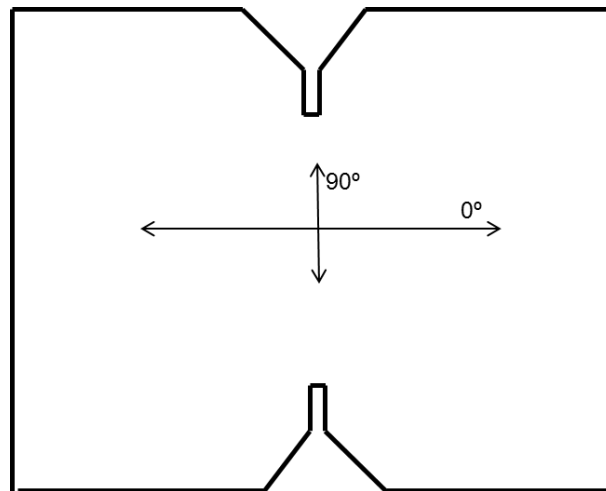


Fig.4. 14 Representação esquemática dos sentidos de medição adotados.

#### 4.5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DA PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

Depois de realizado o ensaio nos 10 provetes obtiveram-se resultados para as frequências de 120Hz e de 1KHz, no entanto, apenas serão tidos em consideração os resultados do ensaio para 1Khz, uma vez que, aquando da medição dos valores da indutância, é também medido um fator de qualidade dos valores medidos. Este fator de qualidade é sempre mais elevado para uma frequência de 1 KHz, o que significa que estes valores são mais precisos e próximos do real, pelo que serão estes os valores analisados daqui em diante.

A tabela dos resultados obtidos pode ser vista em anexo, no entanto, apresenta-se de seguida o gráfico da Fig.4.15 que permite ter uma percepção clara dos resultados do ensaio.

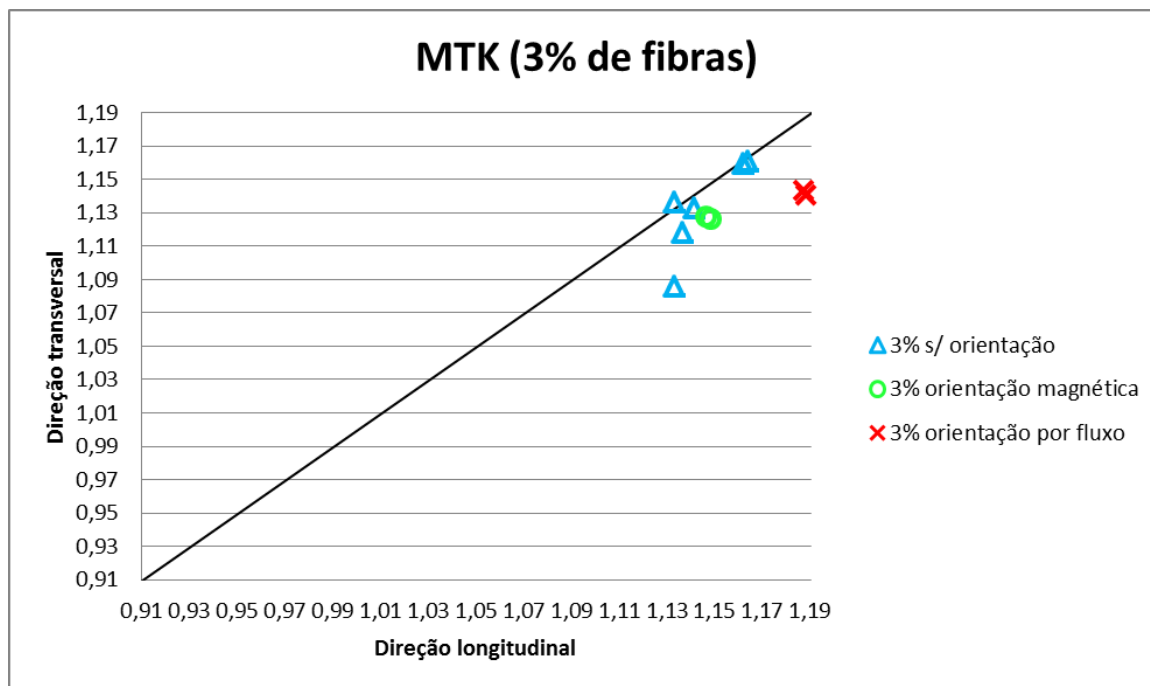


Fig.4. 15 Gráfico representativo dos resultados do ensaio de permeabilidade magnética para os provetes com e sem orientação

Na Fig. 4.15 distinguem-se duas zonas diferentes separadas por uma linha, que divide a orientação a 0° - direcção longitudinal, abaixo da diagonal e a orientação das fibras a 90° - direcção transversal acima da diagonal. Como se pode ver no gráfico anterior mediram-se 6 placas sem orientação, duas com orientação magnética e duas com orientação pelo fluxo.

Para as placas sem orientação é evidente a falta de padrão nos resultados, uma vez que as fibras se dispõem aleatoriamente, contudo verifica-se que nestes casos alguns resultados se aproximam da diagonal, o que vem confirmar esta aleatoriedade na distribuição das fibras aquando da betonagem e noutros ocorreu uma orientação natural das fibras na direcção longitudinal.

Para as placas orientadas de forma magnética, o valor da permeabilidade é mais elevado na direcção longitudinal, sendo que os resultados se localizam abaixo da diagonal como já seria de prever.

No caso das placas orientadas pelo fluxo, também se verifica que a permeabilidade magnética é maior na direcção longitudinal, sendo que esta é mais elevada do que no caso da orientação magnética. Desta forma conclui-se que foram conseguidos resultados satisfatórios de orientação através deste método. Os valores obtidos podem também ser comparados aos resultados do ensaio DEWS, uma vez que, já neste ensaio os resultados foram mais razoáveis no caso da orientação por fluxo, o que indicia o facto de as fibras estarem melhor orientadas, aumentando a permeabilidade na direcção longitudinal e, consequentemente, aumentando a resistência à tração do ensaio DEWS.

#### 4.5.3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS COM A COMPOSIÇÃO DE REFERÊNCIA

O mesmo ensaio de permeabilidade magnética foi feito para os provetes da composição de referência com sílica de fumo e os resultados podem ser analisados no gráfico da Fig.4.16.

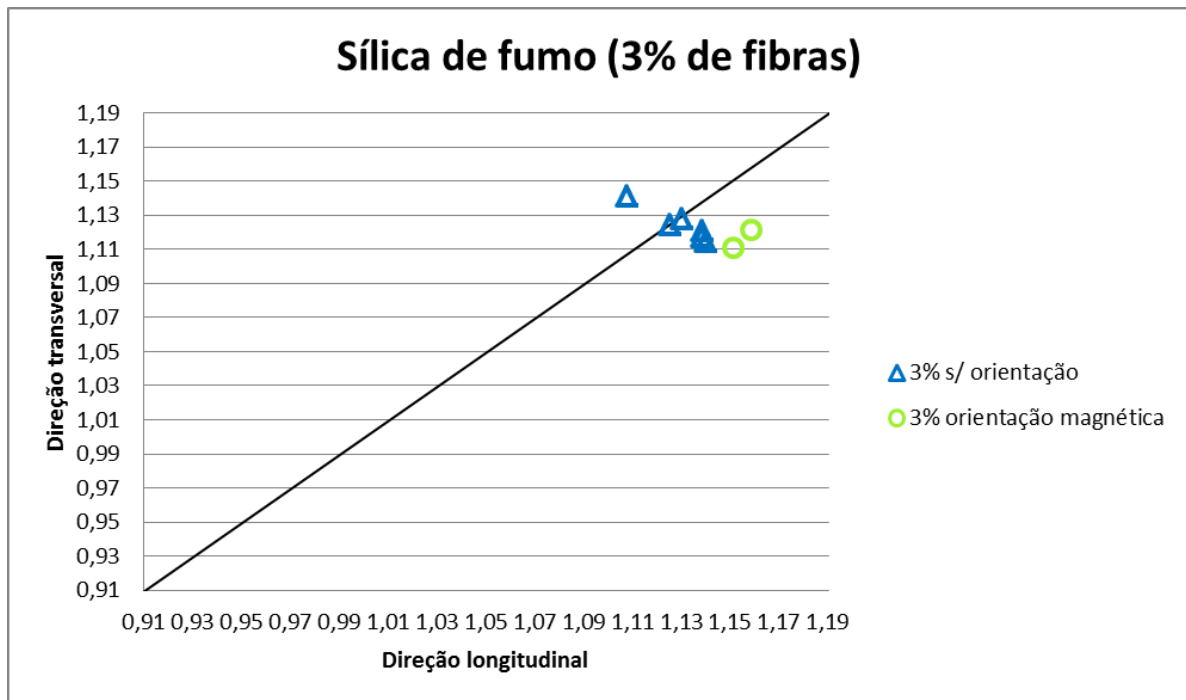


Fig.4. 16 Gráfico representativo dos resultados do ensaio de permeabilidade magnética para a composição de referência.

Os resultados são bastante similares aos obtidos anteriormente. Nesta composição não foi aplicado o método de orientação por fluxo, contudo verifica-se uma similaridade entre os resultados obtidos através da orientação magnética nas duas composições. Como era previsível, nas placas sem orientação os resultados da permeabilidade foram variáveis, sendo relativamente próximos da diagonal, tal como acontecera com a matriz incluindo metacaulino. Esta análise comparativa permite concluir que, de facto, a matriz cimentícia em nada influencia os resultados da permeabilidade magnética, estando estes unicamente ligados à orientação e distribuição das fibras metálicas.

#### 4.6 CORRELAÇÃO ENTRE RESULTADOS DEWS E PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

É possível fazer uma correlação entre os resultados dos ensaios DEWS e os resultados da permeabilidade, uma vez que a orientação e concentração de fibras analisadas através do ensaio de permeabilidade influenciam, sendo as principais responsáveis pelos resultados do ensaio DEWS.

Como tal, na figura 4.17 apresentam-se os valores médios obtidos em cada ensaio, o que permite tirar algumas conclusões.

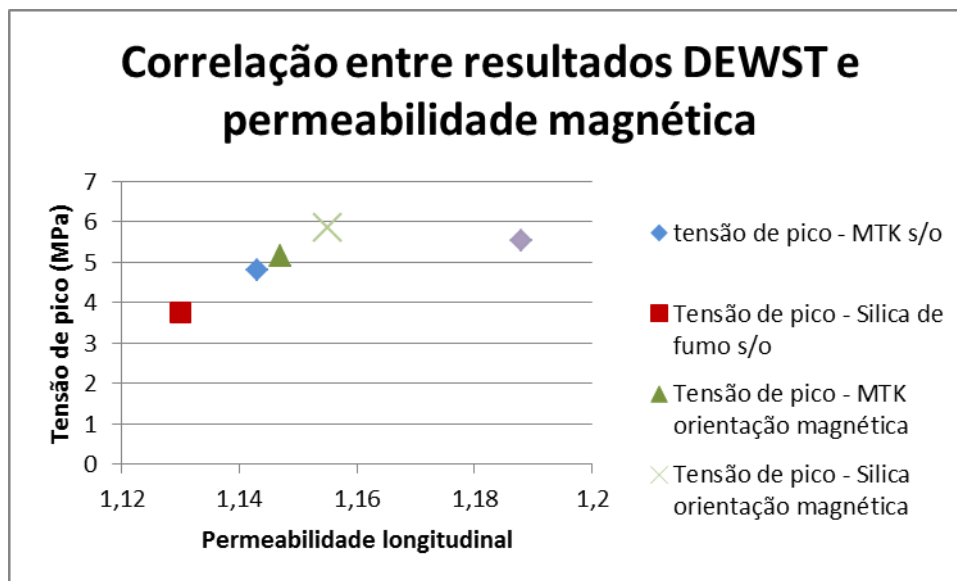


Fig.4. 17 Correlação entre resultados DEWST e permeabilidade magnética

Os resultados mais baixos e mais elevados do ensaio de permeabilidade na direcção perpendicular com plano de falha- permeabilidade longitudinal – correspondem aos resultados mais baixos e elevados do ensaio de DEWS, respetivamente. Nos provetes sem orientação, não há uma variação muito elevada entre os resultados da permeabilidade longitudinal e transversal, como era de esperar. Estes valores são comprovados com os resultados do ensaio DEWS, em que se obtém um valor de resistência à tração mais elevado na composição com metacaulino do que na sílica, sendo a sua permeabilidade longitudinal também mais elevada. Estes valores de resistência à tração, contudo, não são muito elevados, evidenciando o carácter aleatório da orientação das fibras.

Observando agora os resultados dos provetes orientados de forma magnética, verifica-se o inverso do que acontecia anteriormente, ou seja, os resultados da permeabilidade magnética longitudinal são mais elevados na composição com a sílica de fumo, sendo também por isso, a sua resistência à tração mais elevada do que na composição com metacaulino.

Os resultados da orientação por fluxo podem ser comparados aos resultados da composição com metacaulino com orientação magnética. Assim nota-se que, nesta última, a diferença entre a permeabilidade magnética longitudinal e transversal não é tão elevada como a mesma diferença na orientação por fluxo. Posto isso, pode concluir-se, como já tinha sido analisado anteriormente através dos gráficos das figuras anteriores, que a orientação por fluxo teve uma maior influencia nas fibras. Esta análise é comprovada pelos resultados do ensaio DEWS, cujos valores são mais elevados também para o provete incorporando metacaulino e orientado pelo método do fluxo.



# 5

## Permeabilidade magnética no BEDRF incorporando metacaulino

### 5.1 INTRODUÇÃO

Como já foi referido anteriormente, a introdução de fibras no betão de elevado desempenho é crucial para a capacidade de carga do material. Se estas estiverem alinhadas e orientadas na direcção perpendicular ao carregamento, a resistência à tração e a ductilidade aumentam consideravelmente [23].

No âmbito do projecto em que se insere este trabalho, desenvolveu-se um ensaio experimental de permeabilidade magnética que, para além de conseguir inferir acerca da orientação das fibras, também fornece informação sobre a sua concentração e distribuição na matriz.

Neste capítulo pretende-se estudar mais aprofundadamente, a influência da orientação das fibras, bem como do tipo de fibra na permeabilidade magnética. Serão feitos estudos de várias dosagens de fibras, com e sem orientação, bem como com a introdução de armadura, de forma a perceber qual a variação dos resultados em diferentes situações.

### 5.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Numa perspectiva de avaliar a influência do tipo de fibras na permeabilidade magnética, foram utilizadas fibras de 10mm, cujas características já foram apresentadas no capítulo 3. A introdução de fibras de menores dimensões implica que, para uma mesma percentagem, a quantidade de fibras é mais elevada já que a massa se mantém. Utilizaram-se 4 percentagens de fibras diferentes, nomeadamente, 1%, 2%, 3% e 4%, dando origem a 8 placas, sendo que em quatro delas, as fibras estavam orientadas a 0° e nas outras 4, as fibras foram dispostas aleatoriamente. As composições utilizadas estão apresentadas no Quadro 22.

Quadro 21- Composições utilizadas com diferentes percentagens de fibras (Kg/m<sup>3</sup>)

Material	Massa volúmica	Quantidade (kg/m <sup>3</sup> )				
		0,00%	1,00%	2,00%	3,00%	4,00%
CEM I 42.5 R	3160	548,62	548,63	548,63	548,63	548,63
Metacaulino	2200	182,87	182,88	182,88	182,88	182,88
Filer calcário	2680	313,50	313,50	313,50	313,50	313,50
Areia fina	2630	1019,86	993,56	967,26	940,96	914,66
Água	1000	205,00	205,00	205,00	205,00	205,00
Superplastificante	1080	19,86	19,86	19,86	22,50	23,00
Fibras	7850	0,00	78,50	157,00	235,50	314,00

Depois de realizada a amassadura segundo o procedimento já apresentado em capítulos anteriores, foi necessário realizar o ensaio de espalhamento, de forma a garantir a característica auto-compactável intrínseca a este material.

#### 5.2.1 CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO FRESCO

A caracterização do estado fresco foi feita, como já foi referido anteriormente, através do ensaio de espalhamento. A Fig.5.1 procura evidenciar a realização deste ensaio, bem como o espalhamento obtido para cada uma das dosagens na Fig.5.2.

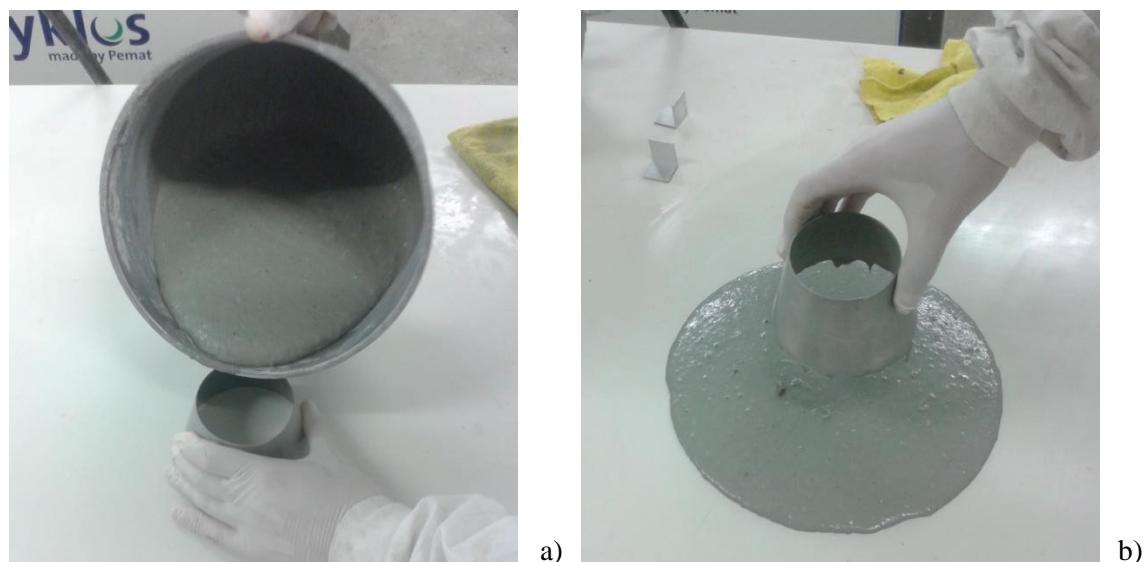


Fig.5. 1 Ensaio de espalhamento: a) Enchimento do cone; b) Espalhamento do betão numa superfície lisa

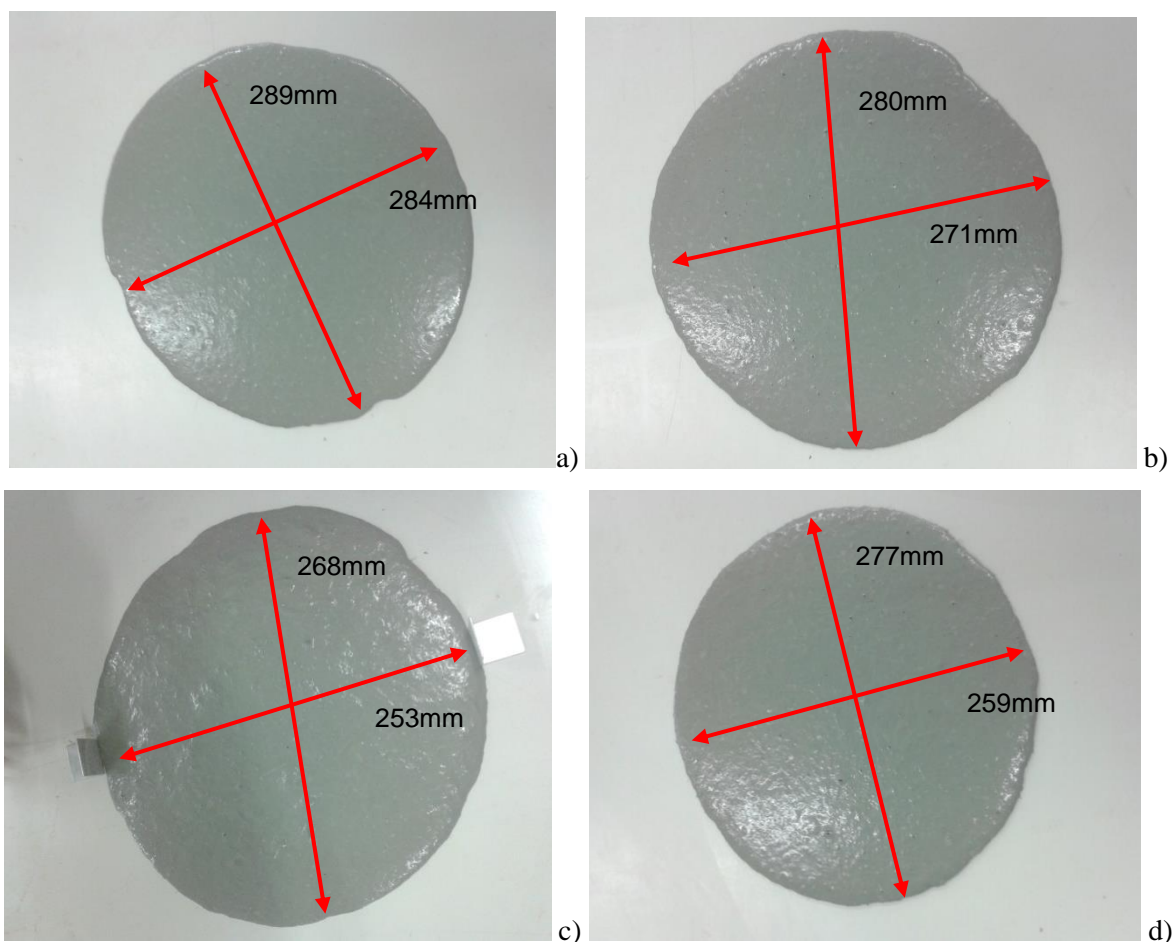


Fig.5. 2 Resultados do ensaio de espalhamento com: a) 1%; b) 2%; c) 3%; d) 4% de fibras

Depois de calculada a média dos diâmetros de espalhamento obtidos, foi possível elaborar o gráfico da Fig.5.3 que representa a evolução do espalhamento com o aumento do fator de forma.

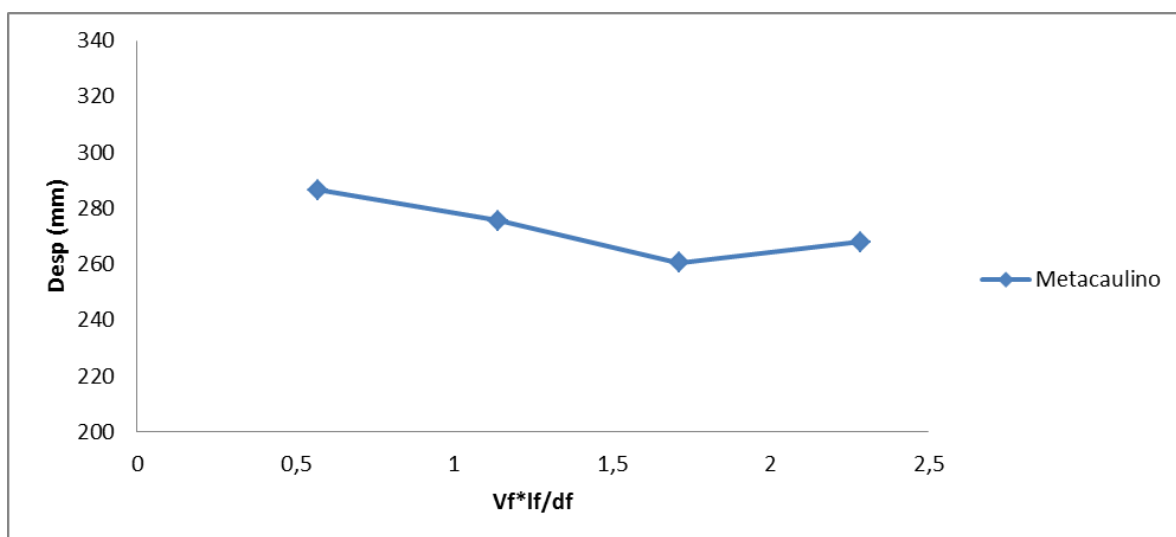


Fig.5. 3 Gráfico representativo da evolução do espalhamento do betão com o aumento do fator de forma

Assume-se que existe uma diminuição da trabalhabilidade com o aumento da percentagem de fibras. No entanto, o valor mínimo foi obtido para uma percentagem de 3%. Como se pode ver na

composição utilizada, para as percentagens mais elevadas foi introduzido um pouco mais de superplastificante para que não se perdesse a trabalhabilidade do material, o que justifica o aumento da mesma para uma percentagem de fibras de 4%.

#### 5.2.2 PROCESSO DE BETONAGEM DOS PROVETES

Após a realização do ensaio de espalhamento procedeu-se à betonagem dos provetes. Esta foi feita de duas formas diferentes, sendo que em quatro dos provetes se utilizou a orientação magnética das fibras e nos restantes quatro, as fibras dispuseram-se aleatoriamente no provete.

O processo de orientação magnética consiste em criar um campo magnético em forma de U, em que os polos positivo e negativo coincidisse com cada um dos lados do “U”. Este equipamento foi desenvolvido pelo Departamento de Eletrotécnica da FEUP sob orientação do professor Adriano Carvalho no âmbito do projeto em que se insere a presente dissertação. Os diferentes componentes do equipamento estão evidenciados na Fig.5.4.

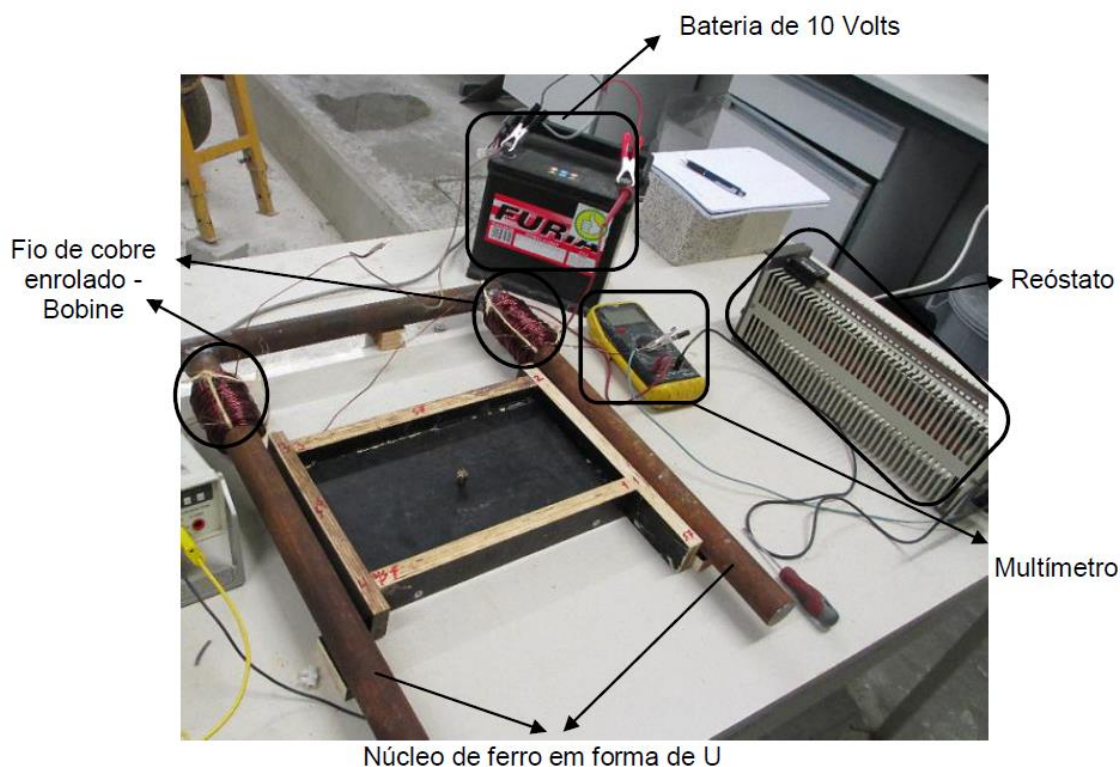


Fig.5. 4 Diferentes componentes do equipamento de orientação magnética das fibras [2]

Este método permitiu orientar as fibras dos quatro provetes a 0° graus, e a sua betonagem foi feita com o molde inserido no equipamento com uma intensidade de corrente de 5 Amperes. Na Fig.5.5 pode ver-se como se procedeu a betonagem de um dos provetes.



Fig.5. 5 Betonagem do provete dentro do equipamento de orientação magnética segundo a direcção de 0°

No caso dos provetes sem orientação, a sua betonagem foi feita fora do equipamento de orientação magnética como se pode observar na Fig. 5.6.



Fig.5. 6 Betonagem do provete com as fibras dispostas de forma aleatória

### 5.3 PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

Como foi já referido no capítulo anterior a permeabilidade magnética é medida através da medição da indutância magnética. No âmbito do projeto foi construída uma sonda composta por um núcleo de ferrite envolvido por um fio condutor elétrico (cobre).

#### 5.3.1 RESULTADOS DA PERMEABILIDADE MAGNÉTICA PARA CADA PROVETE

A permeabilidade magnética é obtida pelas fórmulas (5) e (6) do capítulo anterior e foi medida, em primeiro lugar segundo a direção 0° e 90° no lado esquerdo do provete, que se designa por A1e no lado direito, designado por A2. A permeabilidade é medida nas duas faces do provete, tentando perceber uma possível segregação das fibras. O procedimento pode ser mais facilmente compreendido com a Fig.5.7.



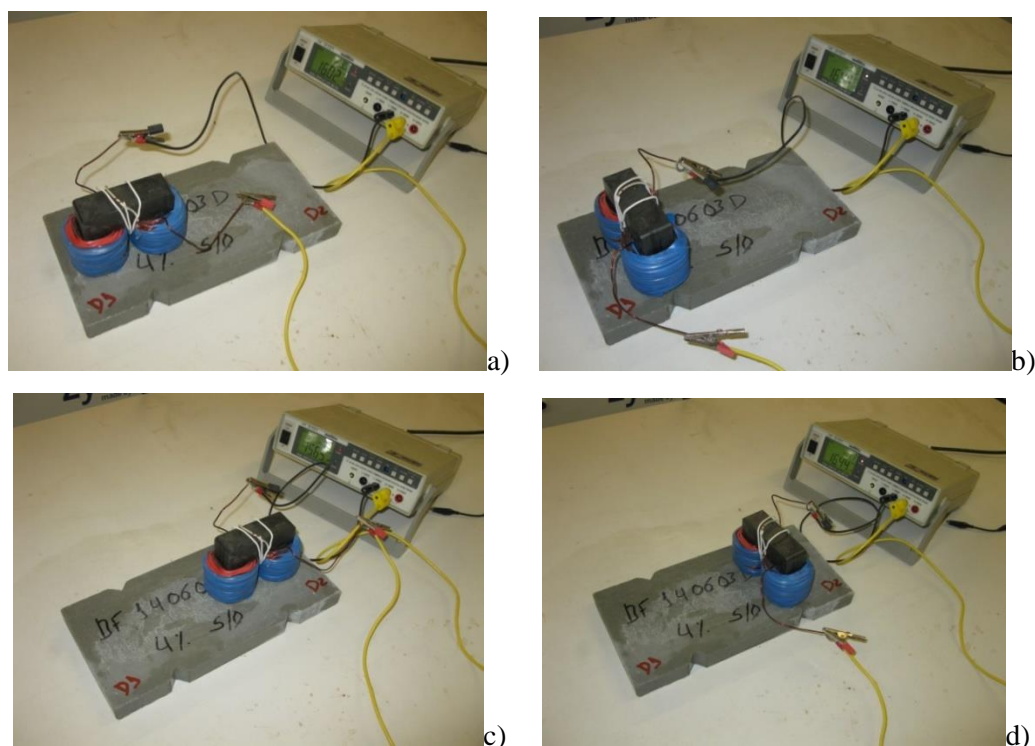


Fig.5. 7 Medição da permeabilidade magnética em cada placa: a) na zona A1 a 0°; b) na A1 a 90°; c) na zona A2 a 0°; d) na zona A2 a 90°

Após concluídas todas as medições, foi possível preencher o quadro 23 e 24 de resultados que permitiu retirar algumas conclusões.

Quadro 22 Resultados da permeabilidade magnética para os provetes sem orientação das fibras

Referência		Massa Volumica (Kg/m³)	Permeabilidade magnética				Diferença
			Face Enchimento		Face moldada		
S/Orientação-1% fibras	Zona A1	2357.21	0º	1.027	0º	1.041	0.014
			90º	1.043	90º	1.045	0.001
	Zona A2		0º	1.025	0º	1.041	0.016
S/ Orientação-2% fibras			90º	1.046	90º	1.049	0.004
	Zona A1	2401.98	0º	1.066	0º	1.075	0.009
			90º	1.077	90º	1.085	0.008
	Zona A2		0º	1.060	0º	1.076	0.017
			90º	1.076	90º	1.081	0.004
S/Orientação-3% fibras	Zona A1	2461.05	0º	1.067	0º	1.108	0.041
			90º	1.123	90º	1.126	0.002
	Zona A2		0º	1.072	0º	1.108	0.036
			90º	1.126	90º	1.126	0.000
S/Orientação-4% fibras	Zona A1	2514.79	0º	1.133	0º	1.154	0.020
			90º	1.155	90º	1.156	0.001
	Zona A2		0º	1.103	0º	1.147	0.044
			90º	1.142	90º	1.157	0.015

Quadro 23 Resultados da permeabilidade magnética para os provetes cujas fibras estão orientadas a 0°

Referência		Massa Volumica (Kg/m³)	Permeabilidade magnética				Diferença
			Face Enchimento		Face moldada		
Orientação 0º-1% fibras	Zona A1	2350,31	0º	1.041	0º	1.046	0.004
			90º	1.045	90º	1.032	-0.013
	Zona A2		0º	1.041	0º	1.047	0.006
			90º	1.049	90º	1.033	-0.016
Orientação 0º-2% fibras	Zona A1	2400,88	0º	1.075	0º	1.088	0.013
			90º	1.085	90º	1.063	-0.022
	Zona A2		0º	1.076	0º	1.090	0.013
			90º	1.081	90º	1.064	-0.017
Orientação 0º-3% fibras	Zona A1	2456,81	0º	1.108	0º	1.135	0.027
			90º	1.126	90º	1.099	-0.027
	Zona A2		0º	1.108	0º	1.140	0.032
			90º	1.126	90º	1.097	-0.029
Orientação 0º-4% fibras	Zona A1	2510,11	0º	1.154	0º	1.175	0.021
			90º	1.156	90º	1.130	-0.025
	Zona A2		0º	1.147	0º	1.178	0.031
			90º	1.157	90º	1.130	-0.027

Segundo os resultados do Quadro 23, sem a orientação das fibras, pode concluir-se a ocorrência de uma ligeira segregação, uma vez os valores da permeabilidade magnética para a face moldada são sempre superiores aos valores da face de enchimento. Isto significa que as fibras tiveram tendência a depositar-se na face inferior do provete.

Analisando o Quadro 24, relativo aos provetes em que as fibras foram orientadas a 0° , os resultados revelam um padrão difícil de explicar, sendo os resultados mais altos na face moldada quando se efetuam medições com a sonda colocada a 0° e mais elevados na face de enchimento quando as medições são feitas com a sonda a 90°.

Fazendo a média dos valores medidos em cada direção para a face moldada e de enchimento para cada zona, foi possível organizar os resultados num gráfico da Fig.5.8, permitindo uma análise mais imediata dos valores obtidos.

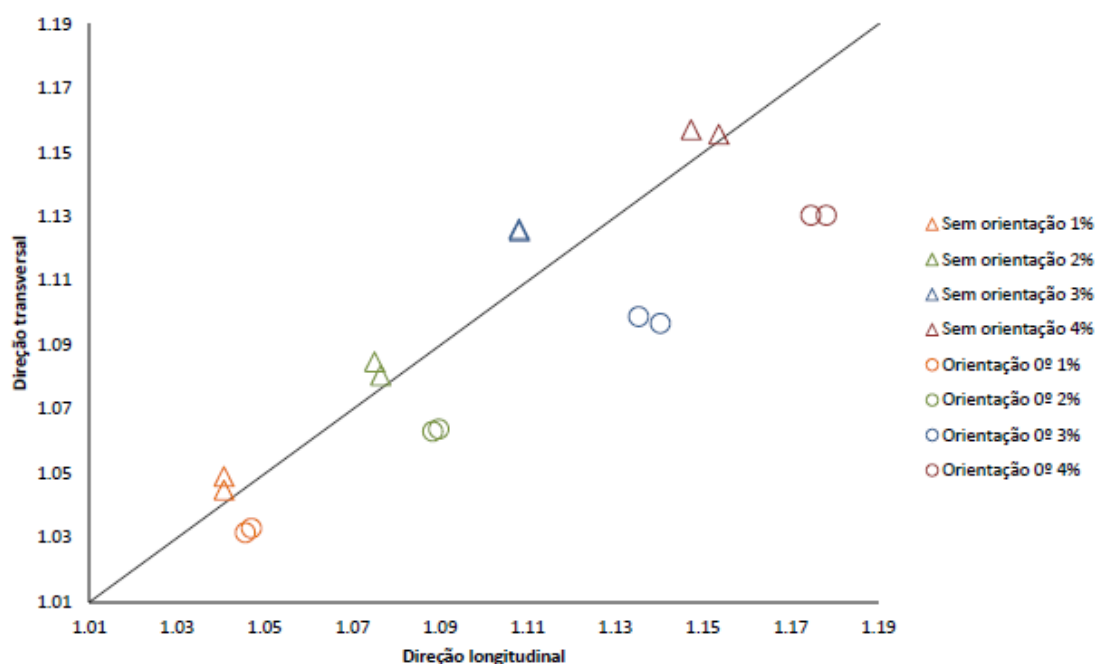


Fig.5. 8 Gráfico representativo dos valores obtidos no ensaio de permeabilidade magnética para os provetes com e sem orientação.

Analisando o gráfico percebe-se com bastante clareza quais os provetes orientados e aqueles em que as fibras se dispuseram aleatoriamente. No caso em que as fibras não foram orientadas, temos resultados de permeabilidade sensivelmente parecidos no que respeita à direção transversal e longitudinal. Isto significa que quando se coloca a sonda a  $0^\circ$  ou a  $90^\circ$  os resultados não diferem significativamente, ou seja, existem fibras igualmente alinhadas nas duas direções. Neste caso os resultados aproximam-se da diagonal que divide o gráfico em duas zonas. Abaixo da diagonal, a permeabilidade magnética é maior na direção longitudinal, o que significa que as fibras estão orientadas nesse sentido. Acima da diagonal as fibras estão dispostas na direção transversal.

No caso dos provetes cujas fibras foram orientadas a  $0^\circ$  confirma-se essa mesma orientação com resultados da permeabilidade magnética superiores na direção longitudinal, ou seja quando a sonda é colocada a  $0^\circ$  no provete. Como era de esperar, os valores da permeabilidade aumentam com o aumento da dosagem de fibras, denotando a capacidade deste ensaio de identificar a concentração de fibras. Os resultados não são idênticos para a zona A1 e A2, uma vez que, aquando da betonagem, as fibras não se distribuem de igual forma por todo o provete, havendo tendência para num ou noutro lado existir uma diferente concentração.

### 5.3.2 INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO DE PLACAS COM DIFERENTES DOSAGENS DE FIBRAS NO ENSAIO DE PERMEABILIDADE MAGNÉTICA.

Numa tentativa de perceber qual a influência da sequência de placas com dosagens de fibras diferentes nos resultados de permeabilidade magnética, foram estudadas 4 configurações diferentes, sendo medida a permeabilidade magnética nos pontos assinalados a vermelho e amarelo na Fig.5.9. Os pontos a vermelho estão dentro do provete, enquanto que os pontos representados a amarelo estão localizados na interseção de duas placas com dosagens de fibras diferentes. Na Fig.5.10 pode observar-se o processo de medição das diferentes configurações.



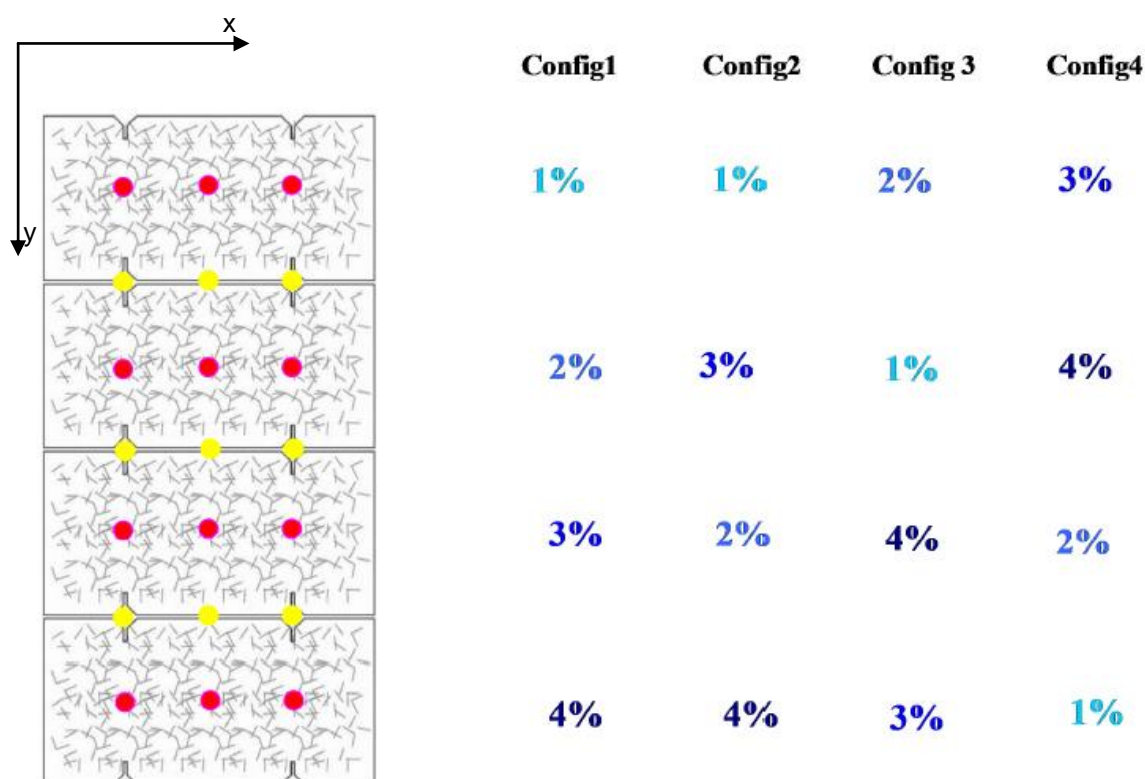


Fig.5. 9 Pontos de medição e diferentes configurações estudadas

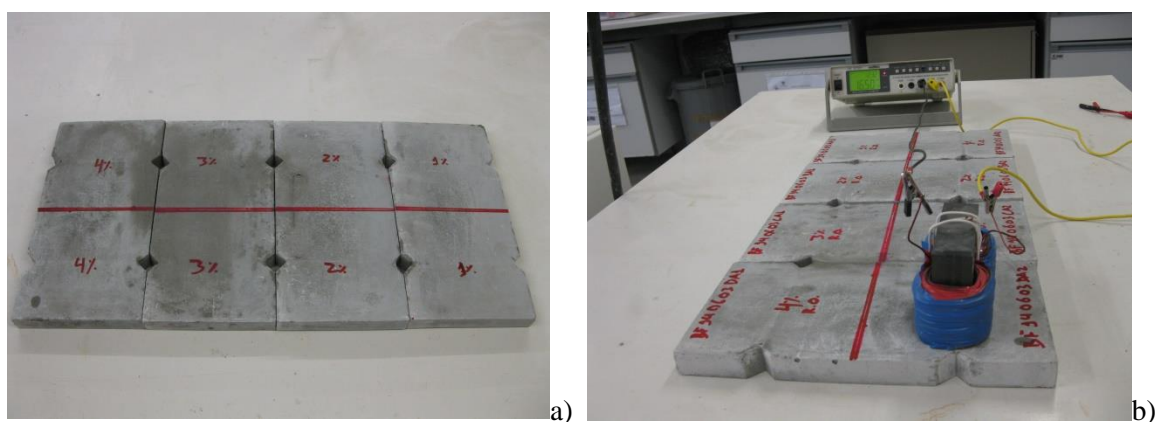


Fig.5. 10 a) Disposição das placas na configuração 1; b) medição a 90°

Depois de medidas as permeabilidades nos diversos pontos segundo as diferentes configurações sugeridas na figura anterior, foi possível representar os resultados numa superfície, onde se consegue distinguir facilmente as zonas onde a concentração de fibras é menor e maior, bem como a sua orientação. Na Fig.5.11 observam-se essas superfícies representativas dos resultados para as medições efetuadas a 0° nas configurações de placas com distribuição de fibras aleatória.

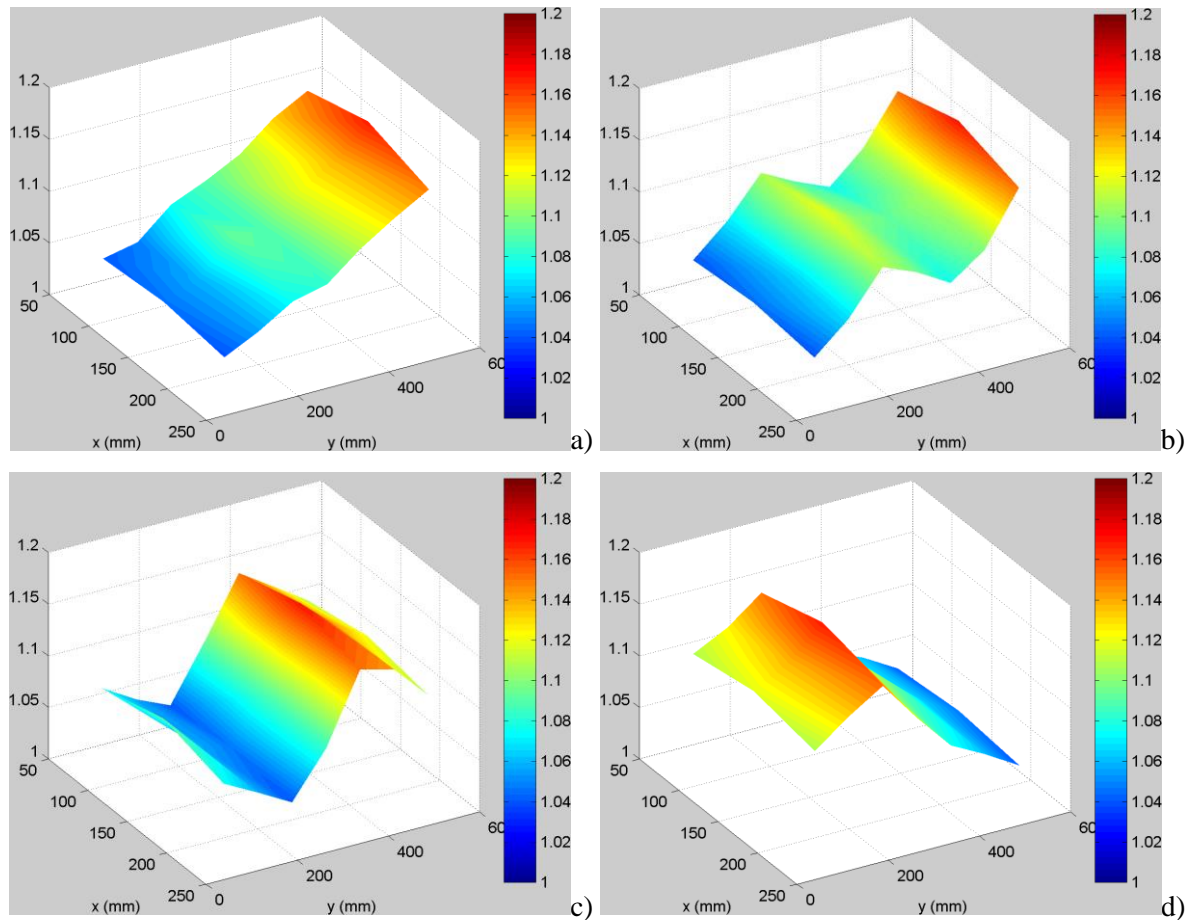
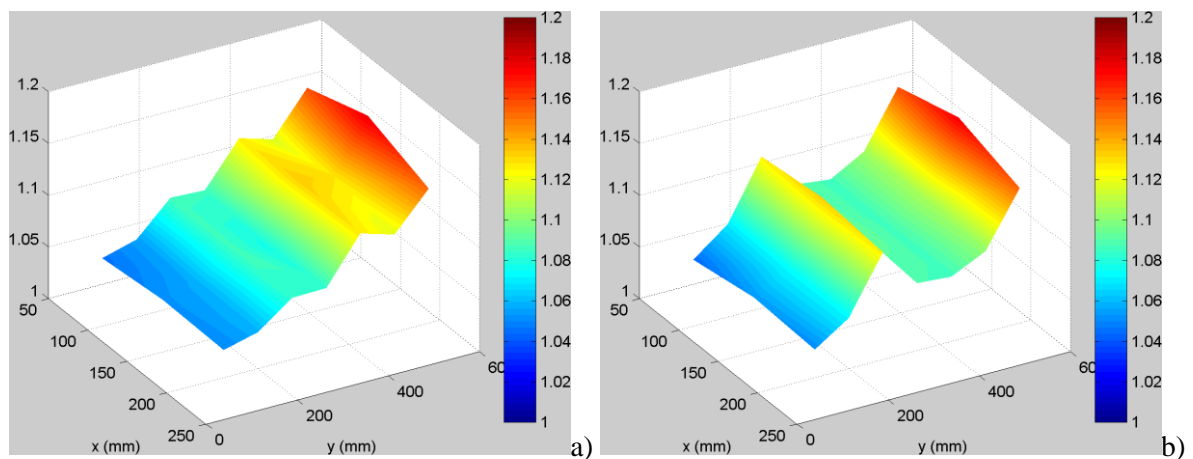


Fig.5. 11 Representação dos resultados da permeabilidade magnética a  $0^\circ$  nas várias configurações dos provetes sem orientação segundo uma superfície de cores: a) Configuração 1; b) configuração 2; c) Configuração 3; d) Configuração 4

Como se pode concluir pela análise da figura, os resultados de cada placa individual não foram alterados pelas diferentes configurações. Na figura 5.11 a) à medida que nos deslocamos nas placas, a concentração de fibras é maior uma vez que passamos de 1% para 4%, como era de esperar. Em todas as outras verifica-se o mesmo, ou seja, sempre que se entra numa placa com dosagem de fibras mais elevada, a permeabilidade aumenta de imediato e vice versa.

Na Fig.5.12 podem observar-se as superfícies de resultados das medições a  $90^\circ$  nas configurações de placas com distribuição aleatória das fibras.



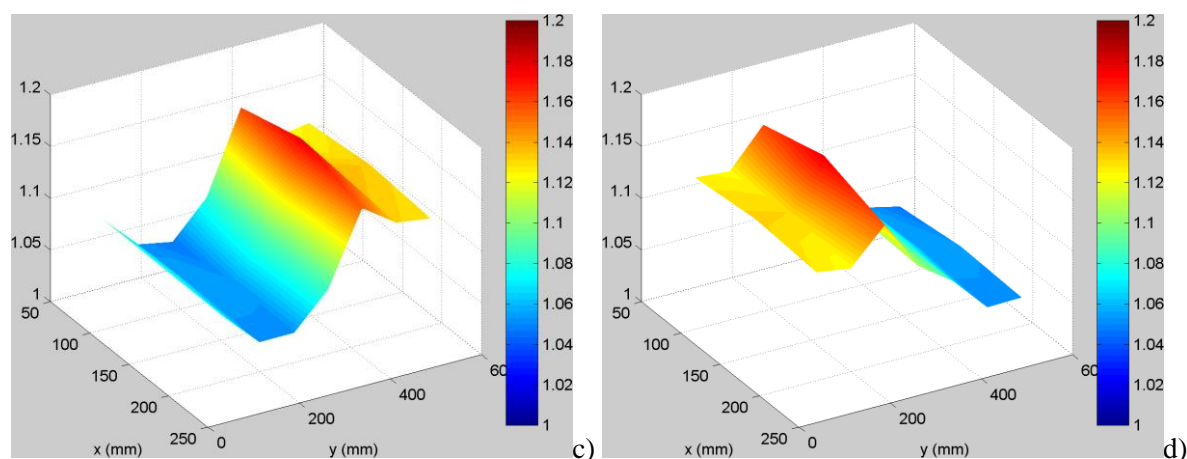


Fig.5. 12 Representação dos resultados da permeabilidade magnética a  $90^\circ$  nas várias configurações dos provetes sem orientação segundo uma superfície de cores: a) Configuração 1; b) Configuração 2; c) configuração 3;d) Configuração 4

Mais uma vez se verifica que as alterações de configuração em nada faz variar os resultados da permeabilidade magnética de cada placa. Porém, verificam-se valores ligeiramente mais elevados nestas medições a  $90^\circ$ , o que coincide com os valores obtidos com as placas em separado, significando que as fibras tiveram uma tendencia natural para se depositarem com esta direção.

Na Fig.5.13 observam-se os resultados das medições a  $0^\circ$  para placas com fibras orientadas a  $0^\circ$  também.

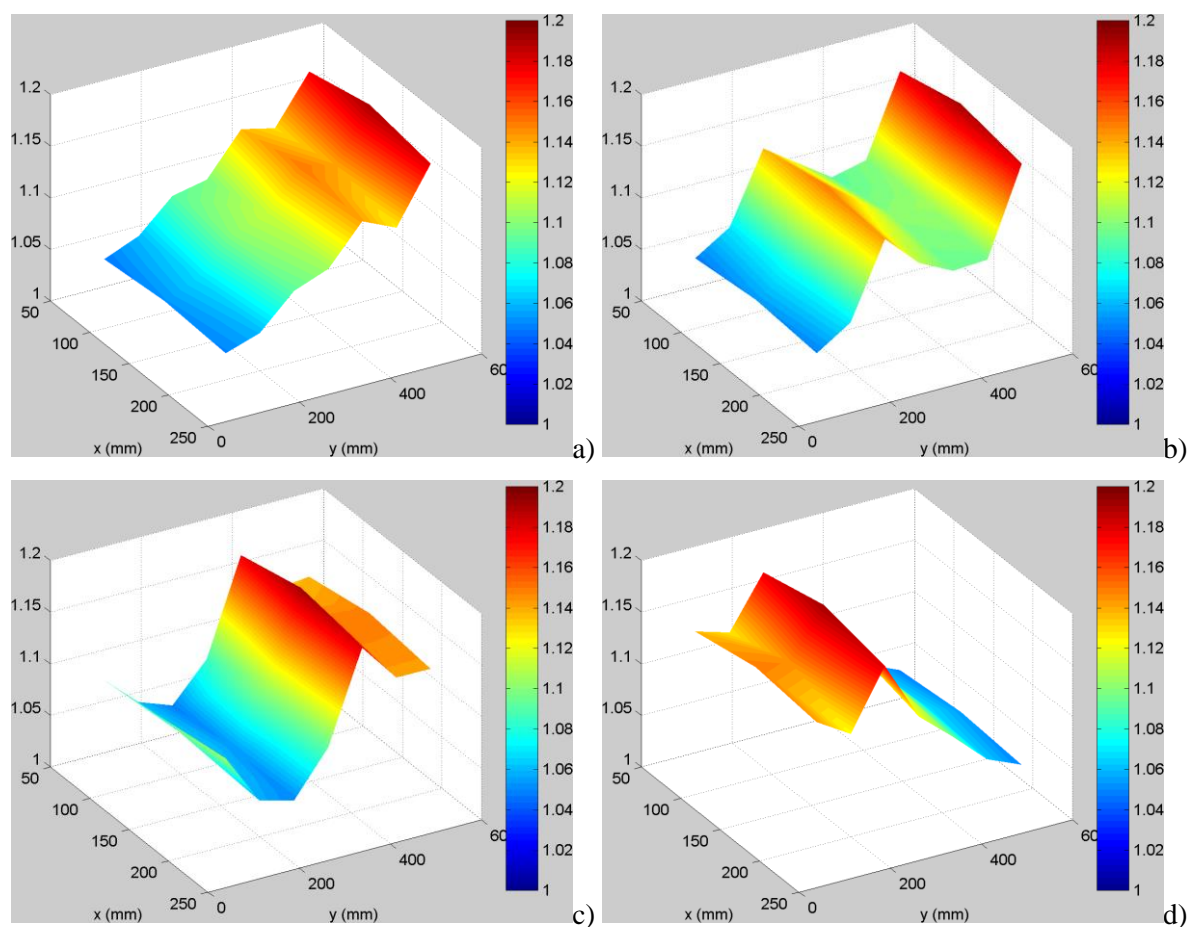


Fig.5. 13 Representação dos resultados da permeabilidade magnética a  $0^\circ$  nas várias configurações dos provetes cujas fibras estão orientadas a  $90^\circ$  segundo uma superfície de cores: a) Configuração 1; b) Configuração 2 c) Configuração 3; d) Configuração 4

O aspeto geral é semelhante ao das imagens anteriores. No entanto, comparando com a medição a  $0^\circ$  para placas com fibras dispostas aleatoriamente, nota-se claramente um aumento significativo nestes resultados a  $0^\circ$ , sendo que a variação de cores é bastante mais acentuada. Estes resultados tinham sido já concluídos aquando da medição da permeabilidade magnética nas placas individuais, sendo que aqui, não se nota qualquer influência da união de provetes.

Por fim, na Fig.5.14 podem ver-se os resultados nas medições a  $90^\circ$  em configurações de placas cujas fibras foram orientadas a  $0^\circ$ .

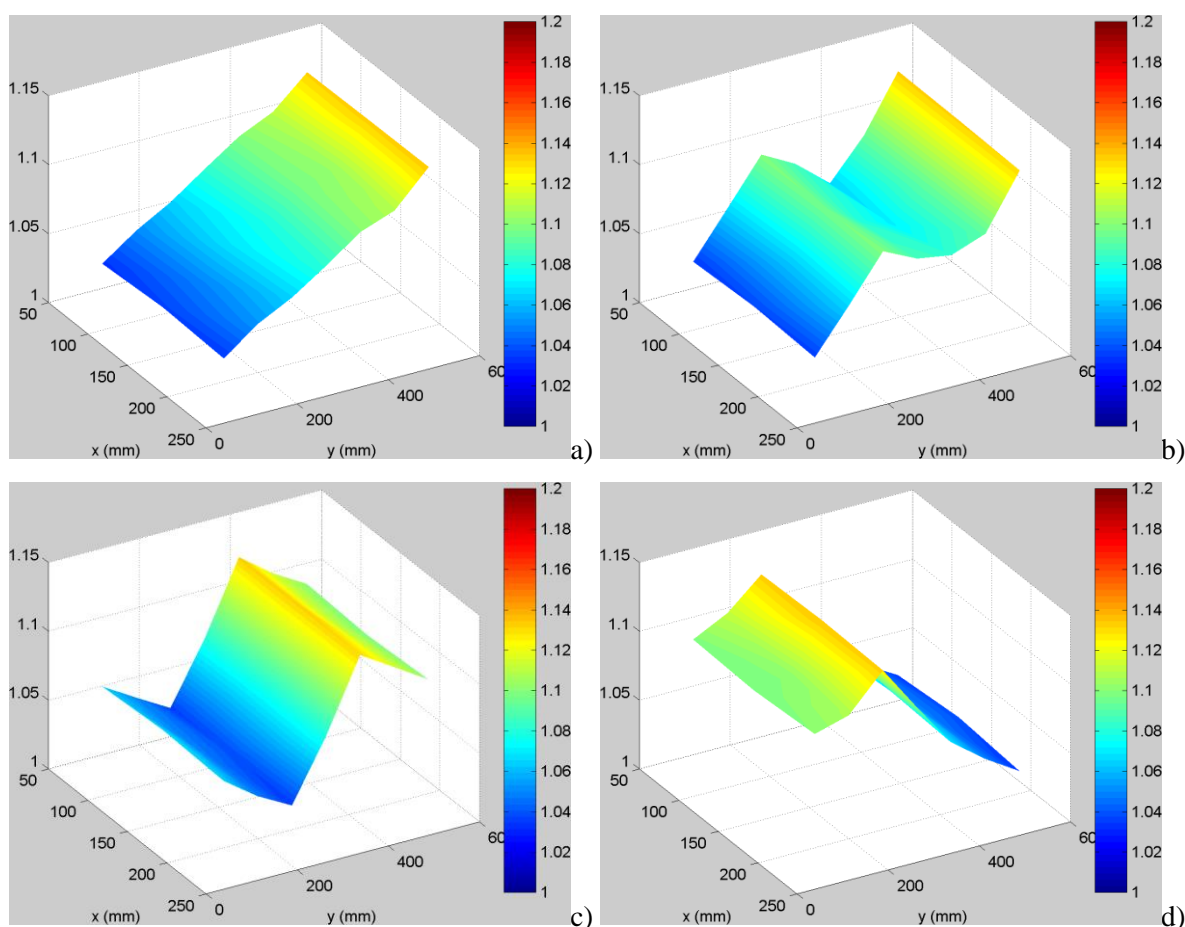


Fig.5. 14 Representação dos resultados da permeabilidade magnética a  $90^\circ$  nas várias configurações dos provetes cujas fibras estão orientadas a  $0^\circ$  numa superfície de cores: a) Configuração 1 b) Configuração 2; c) Configuração 3; d) Configuração 4

Aqui, como era de esperar, apenas variações de cores entre o azul e o amarelo, ou seja a permeabilidade magnética mostrou-se sempre com valores relativamente baixos. Estes resultados não trazem surpresas e apenas comprovam a viabilidade do ensaio, dado que com fibras orientadas a  $0^\circ$ , não se deviam obter valores elevados de permeabilidade com a sonda a  $90^\circ$ .

Pelos graficos da Fig.5.15 consegue perceber-se de forma clara que, de facto, a alteração da posição das placas não influenciou o valor da permeabilidade magnética em cada placa nas zonas A1 e A2.

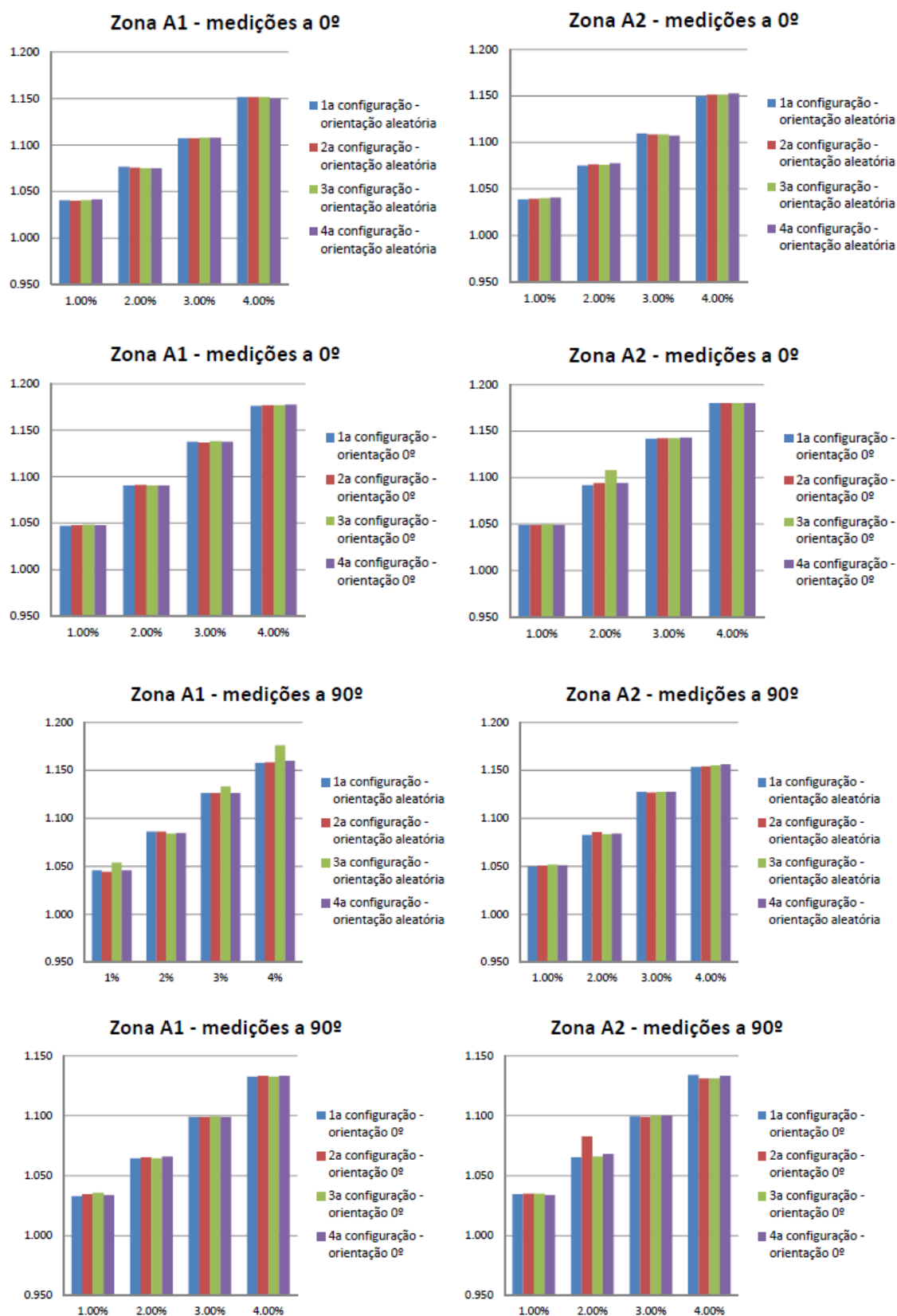


Fig.5. 15 Representação gráfica da influência da alteração de configurações no valor da permeabilidade para cada dosagem de fibras diferente



Nestes gráficos podem ver-se os valores da permeabilidade magnética para cada percentagem nas quatro diferentes configurações. Como pode observar-se os valores são constantes para todas as configurações, dentro das zonas dos provetes com a mesma percentagem de fibras. De uma zona para a outra, a oscilação de resultados é explicada pela distribuição das fibras aquando da betonagem que não é controlável. Apesar do rigor e da tentativa de betonar sempre da mesma forma todos os provetes, a distribuição das fibras pelo provete não é constante. Como se pode ver também, em algumas configurações existem uns valores que apresentam alguma discrepância. Pelo que se pode constatar ao longo do ensaio, isto deve-se essencialmente à posição em que é colocada a sonda e não à variação de configurações. A sonda apresenta uma sensibilidade muito elevada, sendo que os valores variam muito facilmente caso o local de medição varie ligeiramente. Daí que alguns valores se apresentem como diferentes.

### 5.3.3 INFLUENCIA DA INTRODUÇÃO DE ARMADURA NA PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

Como foi já explicado em capitulos anteriores, o BEDRF pode ser usado também com a introdução de armadura quando a sua aplicação assim o exigir. Como tal é de grande relevancia perceber qual a sua influência nos valores da permeabilidade magnética, uma vez que pode inviabilizar a sua aplicação para determinar a orientação e concentração de fibras.

#### 5.3.3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

No sentido de inferir sobre a influência da introdução de armadura no BEDRF nos resultados da permeabilidade magnética, elaborou-se uma estratégia experimental que permitisse verificar a alteração dos valores obtidos.

O procedimento experimental passou por introduzir varões  $\varnothing 12\text{mm}$  de aço sob as placas com fibras. Inicialmente foi colocado apenas um varão no centro da placa longitudinalmente a esta como se pode ver na Fig.5.16 a). Isto permitiu perceber a influência do varão quando a sonda é colocada em pontos em cima deste. Na Fig.5.16 b) pode ver-se o segundo método utilizado em que foram colocados 2 varões espaçados de 10 cm. Esta é uma situação mais próxima do real e permite perceber se, caso a sonda seja colocada entre os dois varões, os valores da permeabilidade magnética se alteram.

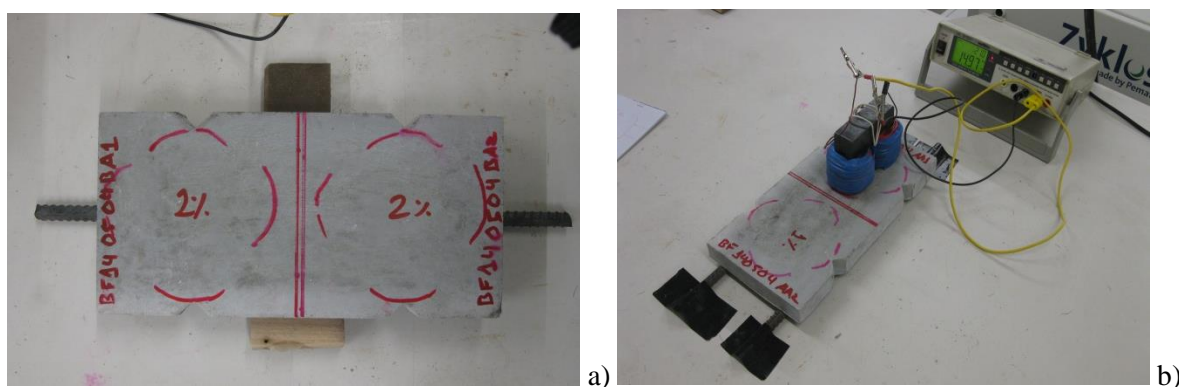


Fig.5. 16 – Introdução de armadura no ensaio de permeabilidade magnética: a) incorporação de um varão centrado; b) medição a 0° de dois varões espaçados de 10cm

Foi então possível organizar os dados em gráficos que permitem uma avaliação mais direta dos resultados. Como tal na Fig.5.17 é possível observar os resultados obtidos para medições a 0° em provetes com orientação aleatória das fibras.

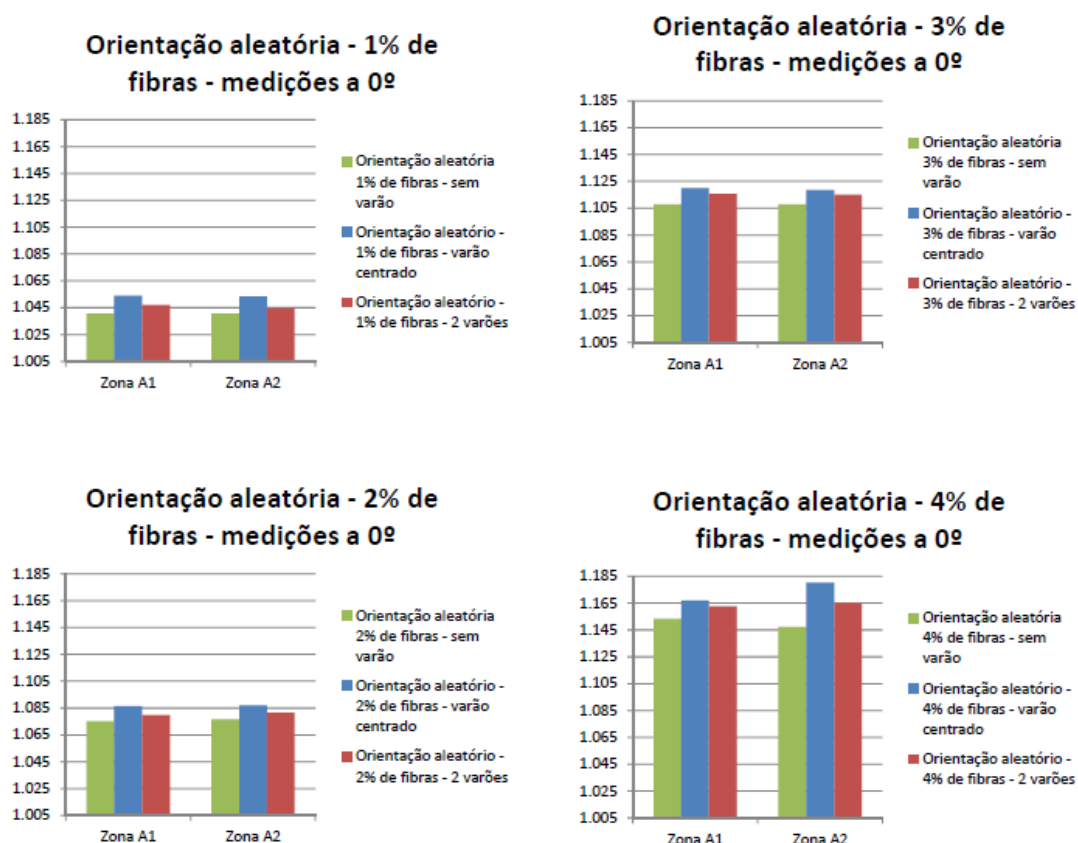


Fig.5. 17 Representação gráfica da influência da introdução da armadura nos resultados da permeabilidade magnética a 0° em cada uma das zonas dos provetes cujas fibras estão dispostas aleatoriamente

Analisando os graficos da Fig.5.17 pode concluir-se que houve uma clara subida nos valores da permeabilidade magnética quando se utiliza um único varão centrado. Uma vez que as medições são feitas, neste caso, a 0°, estes resultados vão ao encontro do previsto, ou seja, um varão único só influencia a permeabilidade quando a medição é efetuada na direção do mesmo.

Na Fig.5.18 apresentam-se os resultados para medições com a sonda a 90° novamente para os provetes com fibras aleatoriamente distribuídas.

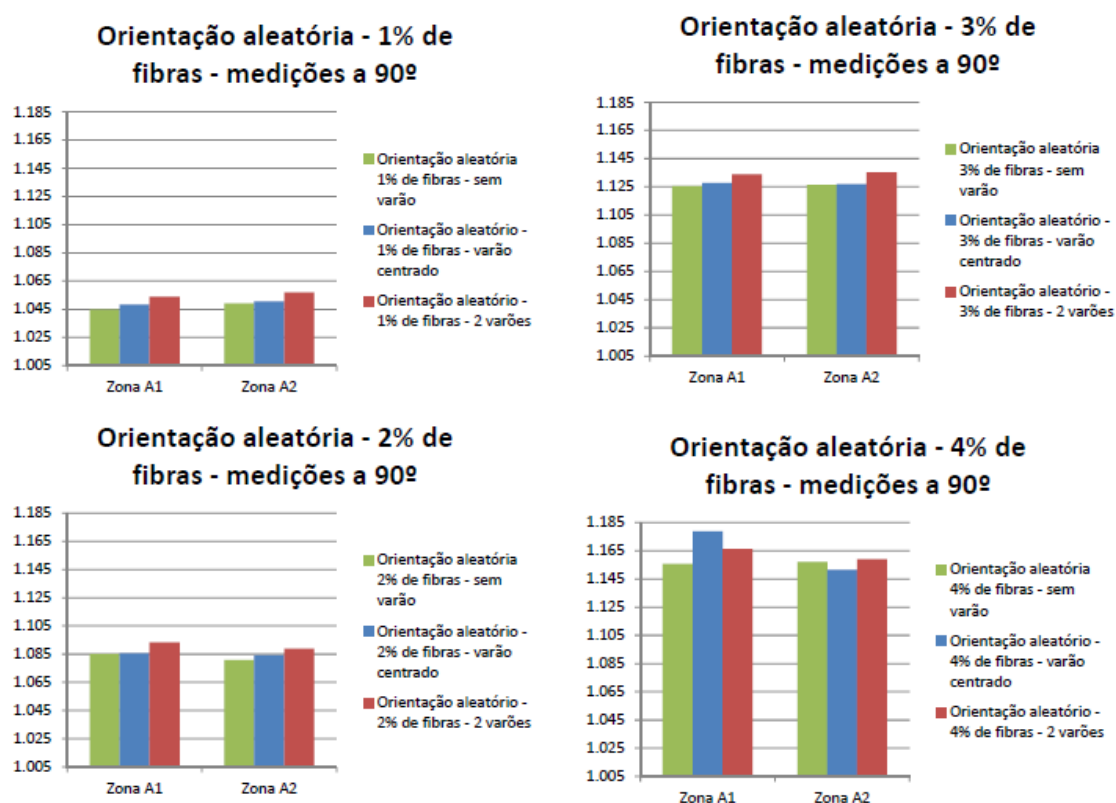


Fig.5. 18 Representação gráfica da influência da introdução da armadura nos resultados da permeabilidade magnética a 90° em cada uma das zonas dos provetes cujas fibras estão dispostas aleatoriamente

Neste segundo caso, em que as medições foram feitas com a sonda a 90° verificam-se valores mais elevados quando se introduzem os dois varões espessados de 10cm. Este resultado também era de esperar uma vez que a sonda é constituída por dois núcleos de ferrite com um espaçamento entre eles. Desta forma quando colocamos a sonda a 90° com os dois varões, os núcleos vão identificá-los, o que não acontece com a sonda a 0°.

Analisando-se mais a pormenor os provetes com 4% de fibras repara-se que os resultados não são coincidentes com os demais, uma vez que na zona A1 a permeabilidade é mais elevada no caso em que apenas se utiliza um varão. Isto pode dever-se a um incorreto posicionamento da sonda uma vez que, todos os outros resultados seguem o mesmo padrão.

Estudando agora os provetes, cujas fibras estão orientadas a 0°, apresenta-se na Fig.5.19 os resultados das medições a 0° também.



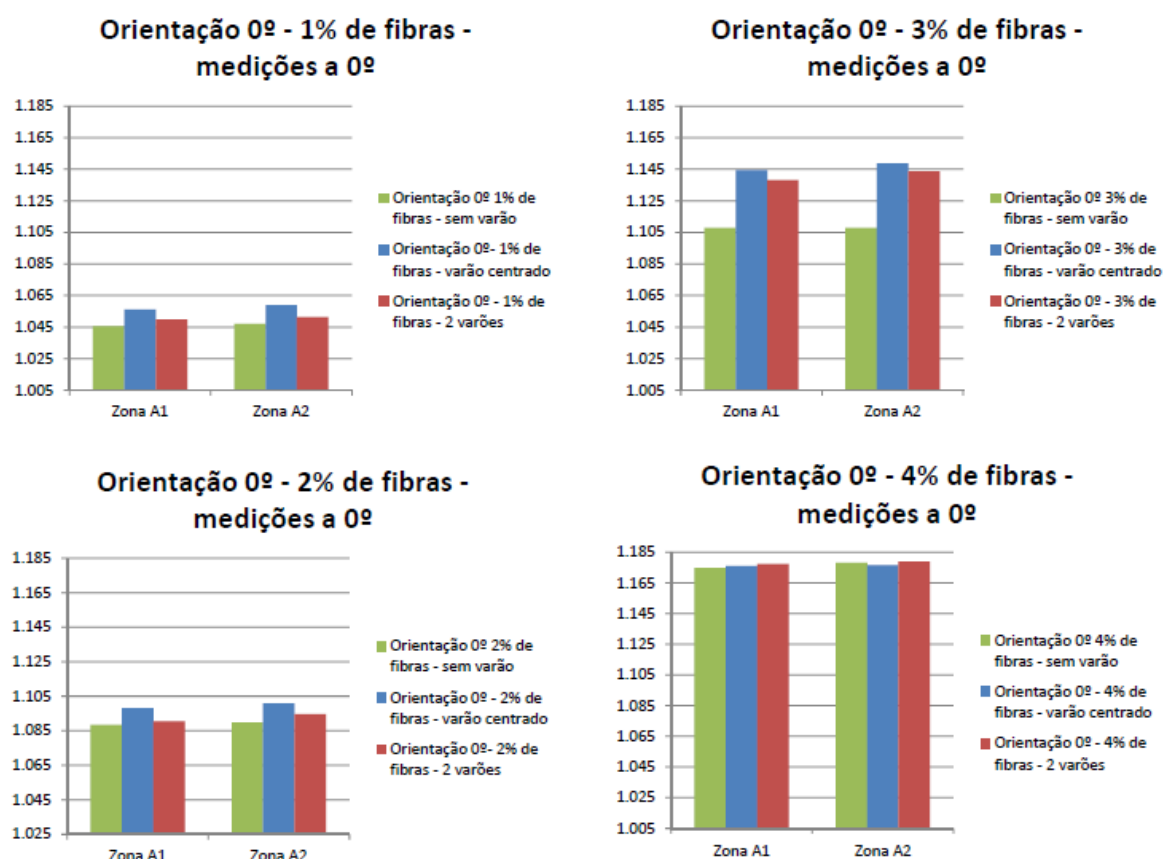


Fig.5. 19 Representação gráfica da influência da introdução da armadura nos resultados da permeabilidade magnética a 0° em cada uma das zonas dos provetes cujas fibras estão orientadas a 0° também.

Como seria de esperar, os valores mais elevados da permeabilidade magnética surgem quando se utiliza um único varão centrado com a sonda. Aqui os resultados são em geral mais elevados graças à orientação das fibras na mesma direção da medição.

Na Fig.5.20, apresentam-se, por fim, os resultados obtidos para os provetes com fibras orientadas a 0° e cujas medições foram feitas a 90°.

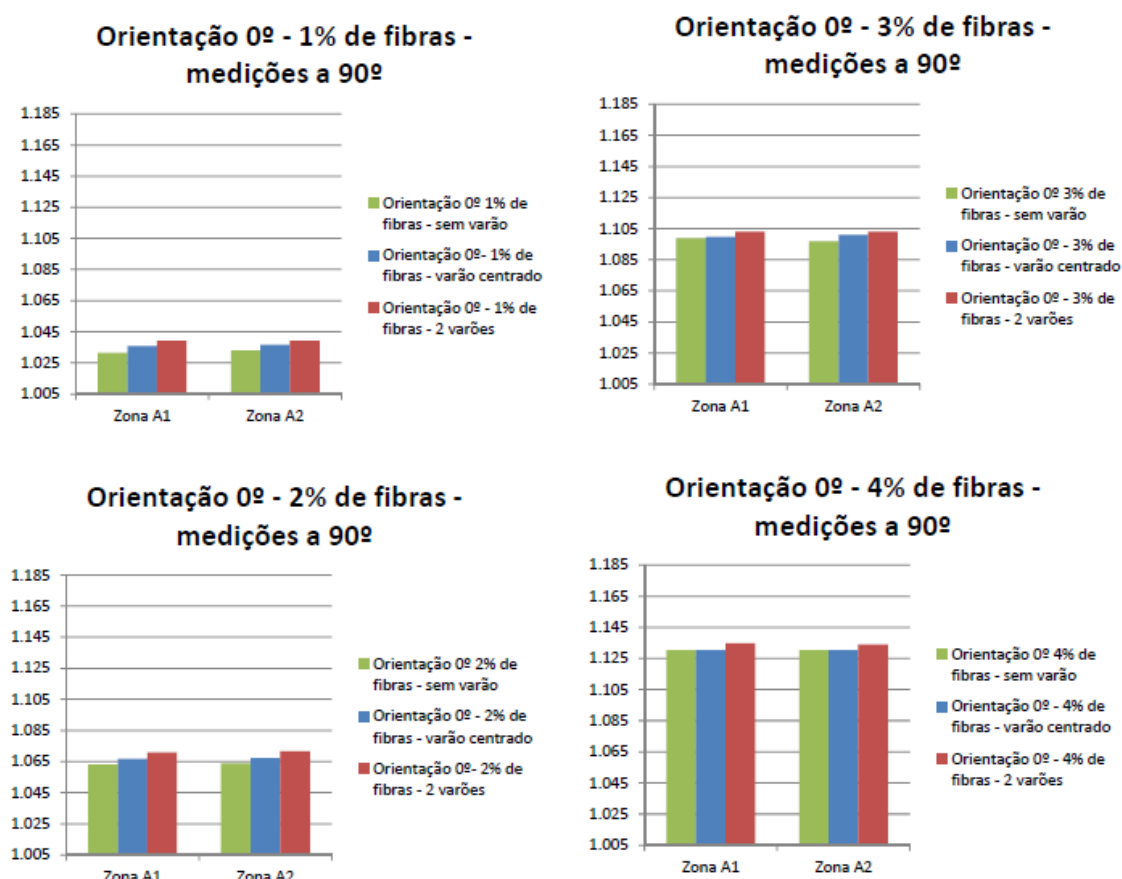


Fig.5. 20 Representação gráfica da influência da introdução da armadura nos resultados da permeabilidade magnética a 90° em cada uma das zonas dos provetes cujas fibras estão orientadas a 0°

De novo, quando as medições são feitas a 90°, a introdução de dois varões é mais influente nos resultados. Porém, e tendo em conta também os resultados das medições a 0°, verifica-se que, quando a percentagem de fibras é mais elevada (4%) a introdução dos varões não intervém de forma clara nos resultados da permeabilidade magnética. Uma possível explicação será que, como a percentagem de fibras é muito elevada, e como a introdução dos varões foi feita sob a placa, a sonda não conseguiu detetar a presença dos mesmos.





#### 5.4 INFLUÊNCIA DO TIPO DE FIBRAS NA PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

De forma a estudar a influência de vários tipos de fibra nos resultados do ensaio de permeabilidade magnética, foi realizado o mesmo procedimento descrito anteriormente. Contudo foram utilizadas fibras de 12mm, 6mm e 9mm numa dosagem de 3%. Foi realizado um volume de 1,4L de BEDRF para cada tipo de fibra dando origem a 4 provetes diferentes, sendo que para as fibras de 6mm aplicou-se também a orientação magnética. O facto de se utilizar a orientação magnética apenas neste tipo de fibras, deve-se ao seu tamanho reduzido, permitindo verificar se o tamanho das fibras influencia este tipo de orientação, já que tinha sido utilizado anteriormente em fibras maiores.

Depois de realizada a amassadura de acordo com o processo descrito no capítulo anterior, realizou-se ao ensaio de espalhamento, no sentido de caracterizar o estado fresco de cada composição.

Os resultados do ensaio de espalhamento podem ser observados no quadro 25.

Quadro 24 Resultados do ensaio de espalhamento para as misturas contendo diferentes tipos de fibras

Tipo de fibras	Lf/df	Espalhamento (mm)	Média (mm)	Aspeto da mistura
12 mm	69	213	215	
		217		
9mm	51	276	281,5	
		287		
6mm – amassadura 1	34	273	273,5	
		274		
6mm – amassadura 2	34	261	262,5	
		264		

#### 5.4.1 ENSAIO DE PERMEABILIDADE MAGNÉTICA PARA CADA PROVETE

Novamente, sete dias após a betonagem dos provetes, realizou-se o ensaio da permeabilidade magnética para cada placa de forma individual. Como já foi referido anteriormente neste capítulo, foram medidos valores com a sonda posicionada a 0° e a 90° para a zona A1 e A2 de cada uma das faces do provete.

Após este ensaio obtiveram-se os resultados apresentados no Quadro 26.

Quadro 25 Resultados da permeabilidade magnética para os provetes com diferentes tipos de fibras, com a sonda posicionada a 0° e 90°.

Referência		Permeabilidade Magnética				Diferença
		Face enchimento		Face moldada		
Sem orientação - 3% fibras 12 mm	Zona A1	0°	1,088	0°	1,123	0,035
		90°	1,126	90°	1,132	0,006
	Zona A2	0°	1,083	0°	1,116	0,032
		90°	1,122	90°	1,125	0,003
Sem orientação - 3% fibras 6 mm	Zona A1	0°	1,079	0°	1,100	0,022
		90°	1,125	90°	1,117	-0,008
	Zona A2	0°	1,088	0°	1,104	0,016
		90°	1,114	90°	1,109	-0,005
Sem orientação - 3% fibras 9 mm	Zona A1	0°	1,090	0°	1,103	0,013
		90°	1,118	90°	1,122	0,004
	Zona A2	0°	1,081	0°	1,102	0,022
		90°	1,126	90°	1,124	-0,002
Orientação 0° - 3% fibras 6 mm	Zona A1	0°	1,115	0°	1,133	0,018
		90°	1,087	90°	1,096	0,009
	Zona A2	0°	1,121	0°	1,130	0,009
		90°	1,082	90°	1,095	0,013

Pela análise do Quadro 26 verifica-se que ocorreu uma ligeira segregação, uma vez que os valores da permeabilidade magnética são em geral superiores na face moldada. Contudo não é uma constante e os valores não são significativos, pelo que não é relevante.

No gráfico da Fig.5.21 representam-se os valores obtidos para que melhor se tenha uma perceção dos resultados.

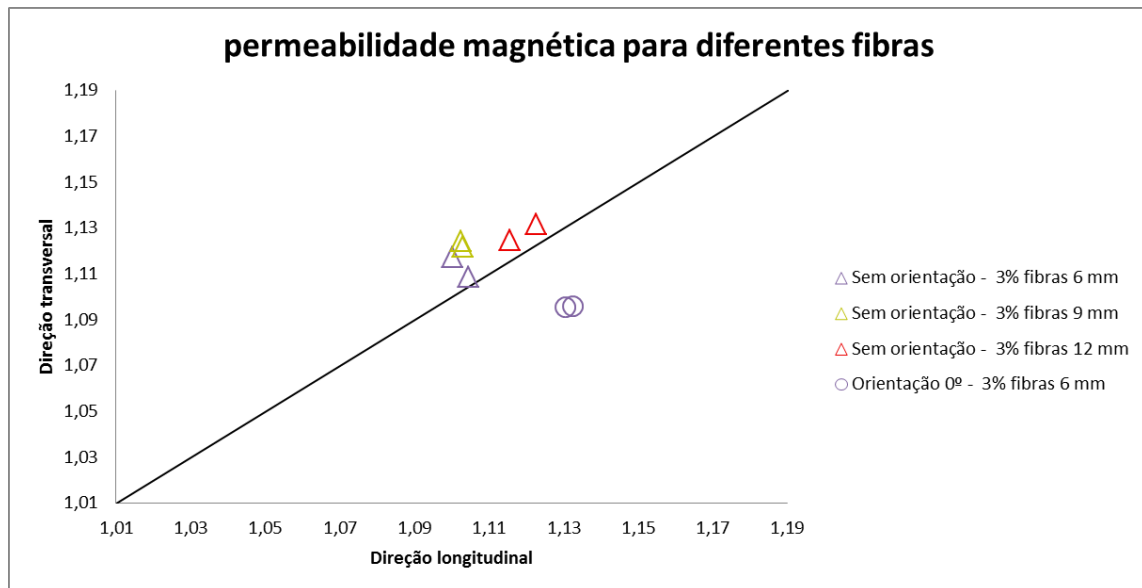


Fig.5. 21 Representação gráfica dos resultados da permeabilidade magnética para os diferentes provetes

Como se pode observar, distinguem-se de forma clara, os provetes não orientados, do provete cujas fibras foram orientadas a 0°. Representado por dois círculos, estão os resultados das zonas A1 e A2 da placa com orientação, estando abaixo da diagonal. Isto indica que os valores da permeabilidade medidos a 0° são mais elevados do que os valores medidos a 90°, comprovando o sucesso na orientação das fibras. Os restantes resultados são aleatórios, estando próximos da diagonal.

#### 5.4.2 INFLUÊNCIA DA INTRODUÇÃO DE ARMADURAS NO ENSAIO DE PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

Como já foi referido anteriormente, o BEDRF pode ser utilizado em combinação com armadura, quando as exigências de desempenho mecânico assim o obrigar. Desta forma é relevante perceber qual a influência da sua inclusão no ensaio de permeabilidade magnética. Como foi já descrito anteriormente neste capítulo foram utilizados dois varões  $\varnothing 12\text{mm}$ , sendo que numa primeira fase apenas se utilizou um varão centrado sob a placa e numa segunda fase, utilizaram-se os dois varões com um espaçamento de 10 cm sob a placa. O procedimento pode ser observado na figura anteriormente apresentada neste capítulo.

As medições foram efetuadas em tres pontos diferentes, nomeadamente no centro, zona A1 e zona A2, e os resultados integrais destas medições com um e dois varões podem ser analisados em anexo. Contudo nos gráficos da Fig.5.22 podem analisar-se os resultados da permeabilidade magnética para os diferentes tipos de fibras com e sem os varões.

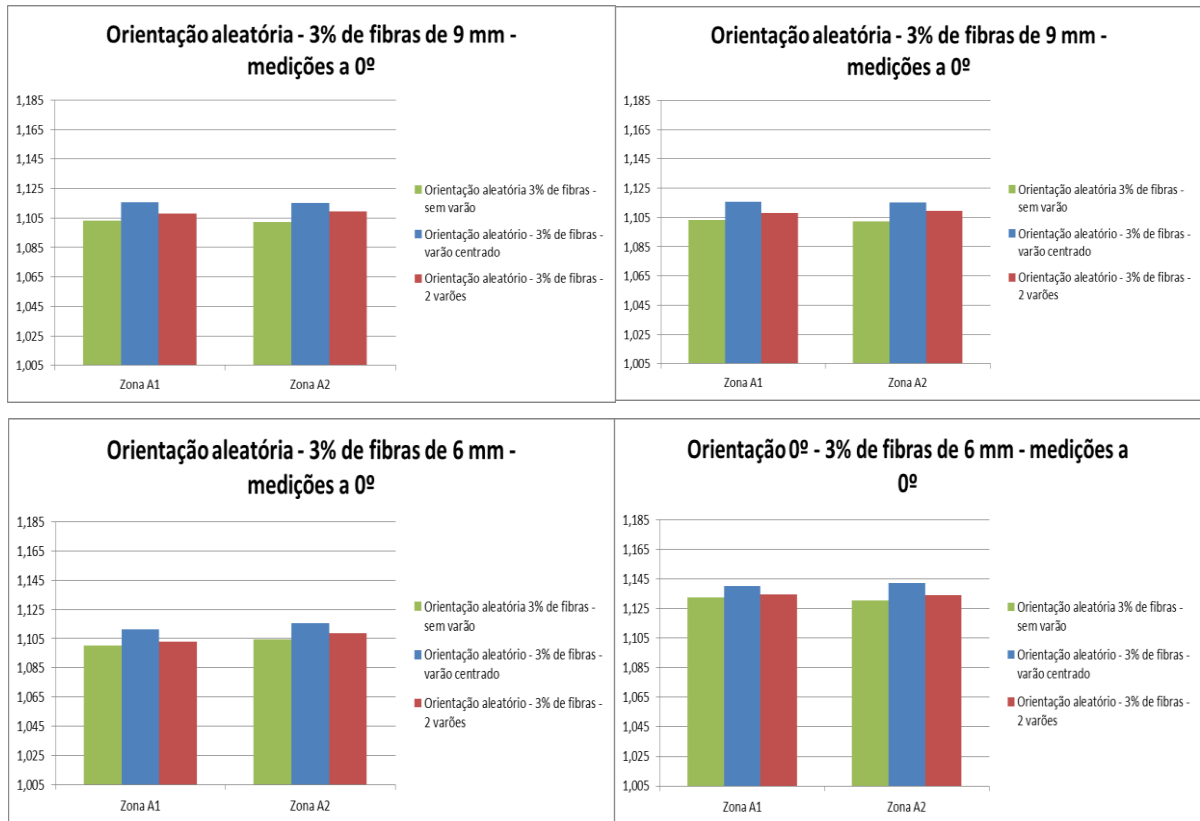
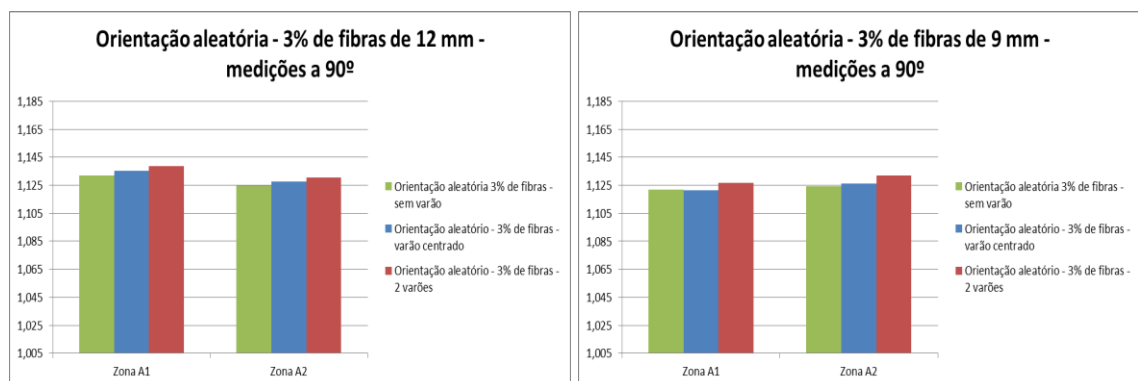


Fig.5. 22 Representação gráfica dos resultados da permeabilidade magnética a 0° para os diferentes tipos de fibras com e sem introdução de armadura

Na Fig.5.22 apresentam-se os resultados para cada zona do provete nas diferentes situações estudadas, com a sonda colocada a 0°. Neste caso, e como já tinha acontecido anteriormente com as fibras de 10mm, obtêm-se valores mais elevados quando existe apenas um varão, sendo é de referir que a sonda está colocada na mesma direção do que ele. Como também se pode observar pela análise dos gráficos, houve um grande aumento dos valores da permeabilidade para os provete com fibras de 6mm orientadas a 0°, o que evidencia a sensibilidade deste ensaio à orientação das fibras.

Fazendo medições com a sonda colocada a 90° no provete, obtêm-se os resultados evidenciados nos graficos da Fig.5.23.



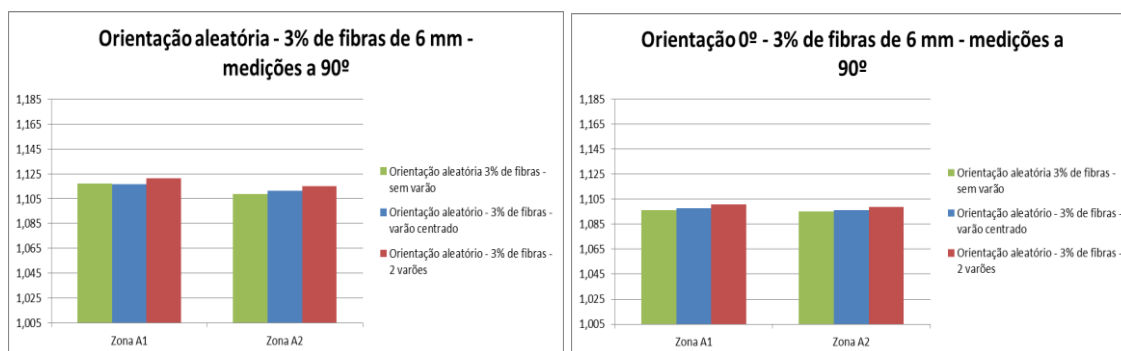


Fig.5. 23 Representação gráfica dos resultados da permeabilidade magnética a 90° para os diferentes tipos de fibras com e sem introdução de armadura

No caso das medições a 90°, os valores da permeabilidade magnética são mais elevados quando utilizados dois varões espaçados de 10cm. Isto ocorre, uma vez que a sonda é constituída por dois núcleos de ferrite espaçados entre eles, o que lhes permite detetar os dois varões, aumentando consequentemente a permeabilidade magnética.

## 5.5 ANÁLISE COMPARATIVA DE RESULTADOS

Com o objetivo de fazer uma análise comparativa entre os resultados obtidos com todos os tipos de fibras estudados, apresenta-se no gráfico da Fig.5.24 os valores da permeabilidade magnética medidos nas duas direções sem inclusão de armadura.

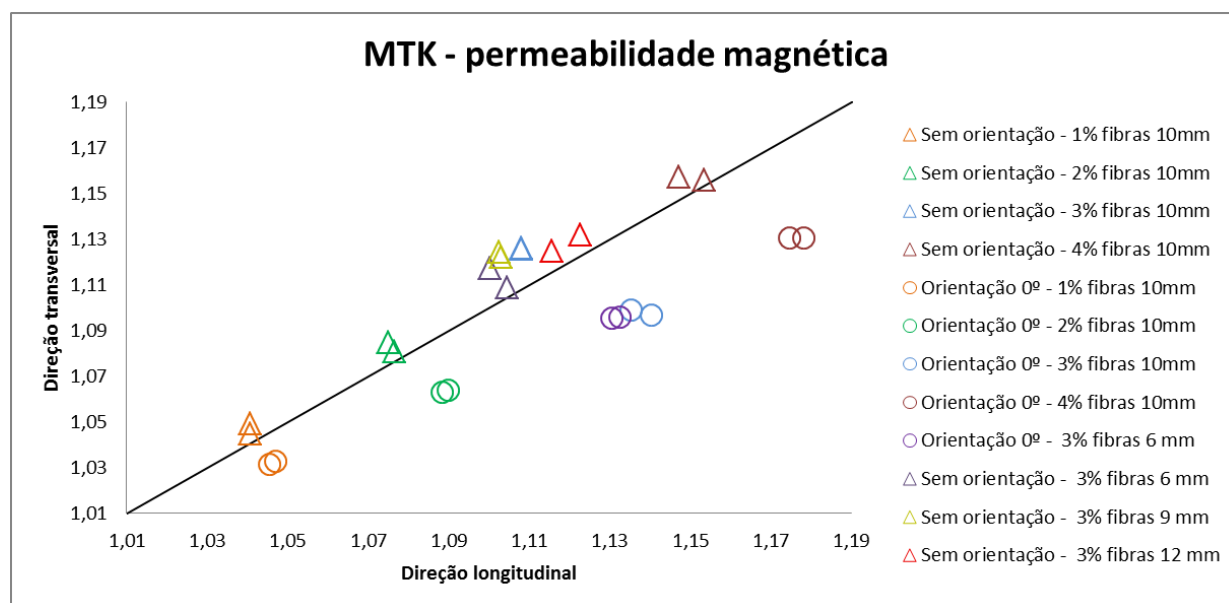


Fig.5. 24 Representação gráfica dos resultados da permeabilidade magnética para os diferentes provetes com e sem orientação incorporando todas as fibras estudadas neste capítulo.

Pela análise do gráfico consegue facilmente distinguir-se quais provetes que têm ou não orientação das fibras. Como já havia sido referido quando as fibras não têm uma orientação específica, os valores da permeabilidade tendem a aproximar-se da diagonal que separa a direção transversal da longitudinal. Isto indica que existem fibras nas duas direções comprovando a aleatoriedade da disposição das fibras e a efetividade dos resultados obtidos através deste ensaio.

No caso das fibras orientadas a  $0^\circ$ , os resultados apresentam-se todos abaixo da diagonal, o que indica que a orientação magnética foi bem sucedida. Através deste gráfico é possível observar que, a permeabilidade magnética aumenta com o aumento da dosagem de fibras comprovando que este ensaio não é somente sensível à orientação das fibras, mas também à sua concentração.

Comparando agora todos os resultados referentes à introdução de armadura, obtêm-se os graficos das Fig.5.25 e Fig.5.26.

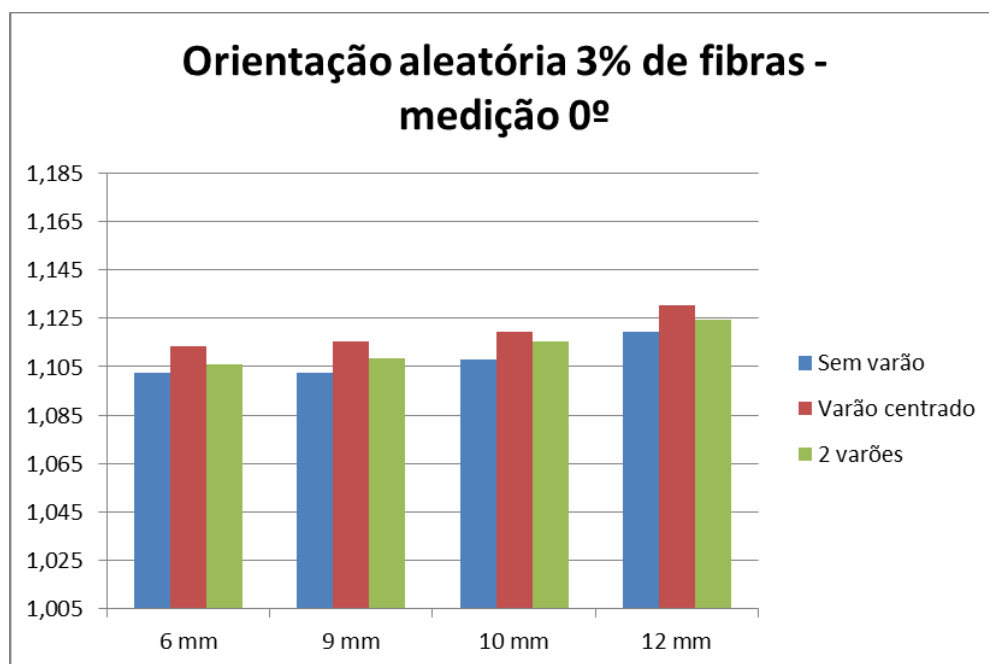


Fig.5. 25 Representação gráfica dos valores médios da permeabilidade magnética a  $0^\circ$ , para uma percentagem de 3% de fibras com introdução de armadura

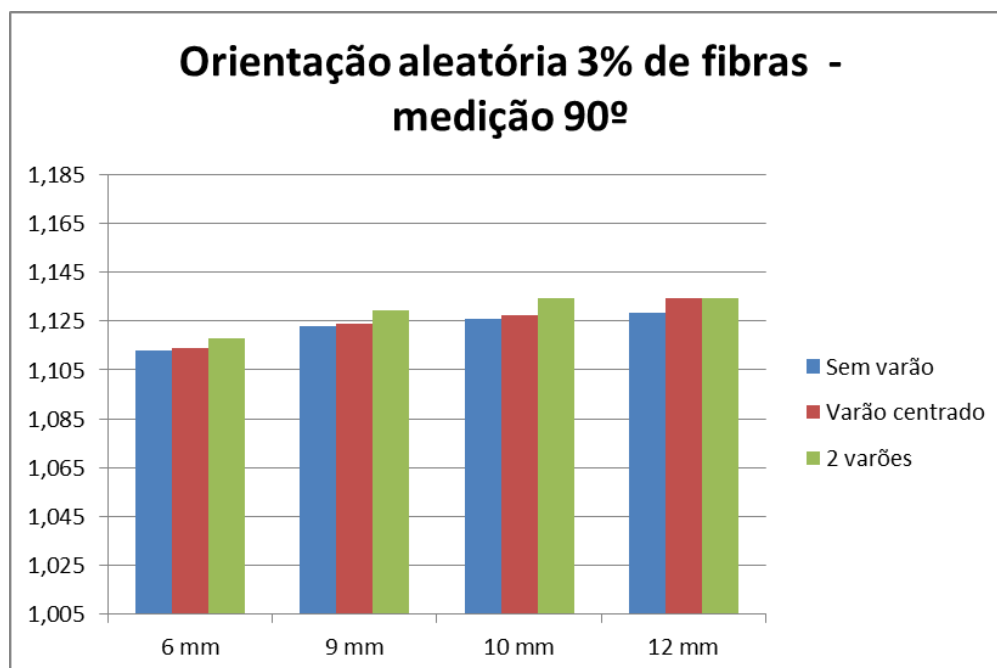


Fig.5. 26 Representação gráfica dos valores médios da permeabilidade magnética a  $90^\circ$ , para uma percentagem de 3% de fibras com introdução de armadura



Como já tem vindo a ser referido ao longo deste capítulo, conclui-se que, a medição a  $0^\circ$  é ligeiramente afetada pela introdução de dois varões espaçados, sendo que a sonda é colocada entre os mesmos, sendo, no entanto, mais clara essa influência quando a sonda é colocada a  $90^\circ$ , nota-se a influência da introdução da armadura, que foi já justificada pela existência de dois núcleos de ferrite, cada qual indentificando um varão. A medição a  $0^\circ$  apenas é afetada quando a sonda é colocado sob o varão, sendo que, por isso, os valores sobem quando utilizamos o varão centrado.

Através dos gráficos anteriores, pode também concluir-se que, a permeabilidade magnética não é apenas afetada pela percentagem de fibras introduzidas, ou pela orientação das mesmas, uma vez que se nota o aumento dos resultados à medida que utilizamos fibras de comprimentos diferentes. Posto isto pode também concluir-se que, a permeabilidade magnética é afetada pelo comprimento das fibras utilizadas.



# 6

## CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 6.1 CONCLUSÕES

Os estudos feitos ao longo desta dissertação permitiram a caracterização e compreensão do comportamento do BEDRF com a adição de metacaulino como substituto da sílica de fumo. O estudo teve dois pontos de incidência. Por um lado procurou-se caracterizar no estado fresco e endurecido, uma composição incorporando metacaulino e, por outro lado, estudar de forma aprofundada a influência do tipo de fibras, da sua orientação e concentração nesta mesma composição no ensaio de permeabilidade magnética.

Depois de feito um levantamento bibliográfico que se apresentou como ponto de partida para este estudo no capítulo 2, passou-se para a selecção da composição mais adequada no capítulo 3. Uma vez que um dos objectivos da composição a seleccionar era o seu grau de compacidade, que deveria ser o maior possível, foi inicialmente feito um estudo da água livre em pastas. Este estudo baseou-se essencialmente em testar um conjunto de composições, analisando, após a centrifugação das mesmas a quantidade de água livre. Depois de analisados os resultados concluiu-se que as composições em que se obteve maior compacidade tinham em comum o facto de possuir uma maior percentagem de filler calcário, menor quantidade de cimento e de metacaulino em relação às outras composições com a mesma quantidade de água introduzida. Assim, foram seleccionadas três composições de pastas que foram utilizadas para o estudo de argamassas. Como característica do BEDRF, tinha-se a menor razão w/c possível, como tal, a definição das argamassas teve em conta este objectivo. Verificou-se, porém, que devido à elevada superfície específica das partículas de metacaulino, a quantidade de água necessária é superior à utilizada na composição de referência com sílica de fumo. O valor mínimo obtido para a razão w/c foi de 0,374 enquanto na composição de referência conseguiu-se uma razão w/c de 0,24.

Após a definição das composições, passou-se à caracterização do estado endurecido sem fibras. Foram feitos ensaios à tração e compressão, concluindo-se que os melhores resultados foram obtidos para a composição que incorporava maior percentagem de metacaulino, conseguindo-se valores de resistência à tração em ensaios de flexão de 14,66MPa e à compressão de 92,55MPa.

Finalmente foram introduzidas diferentes dosagens de fibras de 12,5mm de comprimento na argamassa que obteve melhores resultados. Testando percentagens de 1,5%, 2,25% e 3% concluiu-se que a composição com 3% teve um bom comportamento no estado fresco, mantendo as suas características auto-compactáveis testadas no ensaio de espalhamento. Desta forma, passou-se à caracterização do estado endurecido aplicando o ensaio DEWS. Apesar de se notar o aumento da

resistência à tração com o aumento da percentagem de fibras, esta mostrou-se aquém da capacidade mecânica atingida na composição de referência com sílica de fumo.

Com o intuito de estudar a influência da orientação das fibras na capacidade mecânica deste material, realizou-se uma amassadura maior com 3% de fibras que permitiu betonar vários provetes, sendo que, foi aplicada a orientação magnética e por fluxo em alguns deles. Verificou-se que esta composição é bastante vantajosa no que diz respeito à distribuição das fibras, uma vez que a sua viscosidade evita a segregação das fibras. Após realizado o ensaio DEWS em diferentes idades, concluiu-se que não houve evolução da resistência à tração com a idade, quer para os provetes sem orientação das fibras, quer para os provetes com orientação magnética, obtendo-se uma resistência máxima de 4,8MPa. A composição comportou-se melhor com as fibras orientadas pelo método de fluxo, adquirindo uma resistência à tração de 5,5 MPa. Comparando estes resultados com o Betofibra (9mm+12mm) estudado anteriormente no âmbito do projecto em que se insere este trabalho, verifica-se que os valores obtidos ficam muito aquém dos 18,37MPa obtidos anteriormente. Porém concluiu-se que esta diferença significativa pode estar relacionada com as fibras utilizadas neste trabalho que, para além de maiores e mais pesadas dificultando a sua orientação por meios magnéticos, também têm uma resistência inferior às utilizadas no Betofibra.

Com a aplicação do ensaio de permeabilidade magnética, foi possível comprovar que, de facto, as fibras conseguiram uma melhor orientação com o método do fluxo, o que justifica os resultados do ensaio DEWS.

Passando depois ao estudo da permeabilidade magnética no BEDRF incorporando metacaulino com diferentes tipos de fibras, conclui-se que, o ensaio é bastante sensível à posição da sonda no provete, sendo que uma ligeira alteração faz variar os resultados. Verifica-se também que diferentes sequências de placas com diferentes dosagens de fibras não alteram os valores da permeabilidade de cada uma delas. Com a utilização de diferentes dosagens e diferentes tipos de fibras, conclui-se que, os resultados, para além de aumentarem com a dosagem de fibras utilizadas, aumentam também com o comprimento das fibras.

A introdução de armadura permitiu concluir que, quando introduzidos dois varões espaçados de 10cm, ocorrem alterações mais acentuadas nos resultados para medições a 90°. No caso de apenas ser introduzido um varão centrado na placa, há alteração dos resultados nas medições a 0°, que também é justificado com o facto de a sonda ser colocada longitudinalmente ao varão. À medida que se aumenta a dosagem de fibras, esta variação de resultados vai sendo menor. Concluiu-se que isto ocorre, uma vez que sendo a dosagem elevada, os varões passam a ter um papel irrelevante, sendo que a sonda deteta apenas as fibras.

## **6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

O betão de elevado desempenho reforçado com fibras é um material com enorme potencialidade e que permitirá no futuro revolucionar a engenharia civil, permitindo formas mais arrojadas, com maior capacidade mecânica e maior sustentabilidade e eco-eficiência na construção. Como tal, e apesar de já existir muito trabalho em torno deste material, há ainda muito por descobrir e melhorar.

Neste trabalho estudou-se a incorporação do metacaulino no BEDRF. No entanto, concluiu-se que os resultados não foram os mais satisfatórios. A utilização de fibras de grande dimensão, diâmetro e baixa resistência à tração pode ter estado na origem deste comportamento, como tal seria justificável como estudo a realizar no futuro a utilização de fibras de menores dimensões e maior resistência em combinação com a matriz que incorpora metacaulino..

Como se sabe já, a utilização da sílica de fumo tem vantagens óbvias neste material. Nessa medida e segundo vários autores sugerem seria de grande interesse utilizar na mesma composição o metacaulino e a sílica de fumo e analisar o comportamento deste material à tração e compressão.

A durabilidade é também um dos grandes problemas do betão, como tem vindo a ser referido ao longo deste trabalho. Nessa medida, e na impossibilidade de realizar esse estudo ao longo desta dissertação, sugere-se um estudo mais aprofundado dos mais diversos indicadores de durabilidade em composições utilizando metacaulino e fibras.

Deve-se continuar a desenvolver a caracterização deste material analisando outras propriedades como a retracção e fluência.

Por fim, a aplicação deste material em elementos estruturais reais e a introdução do produto no mercado depois de devidamente estudado e caracterizado surge como objectivo final da investigação experimental.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Ribeiro, F., *Betão de elevado desempenho reforçado com fibras*. Dissertação de mestrado, Faculdade de engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- [2] Soares, C.R.P., *Ensaaios não-destrutivos para a caracterização de betões de elevado desempenho reforçado cm fibras*, in *Engenharia Civil*. 2013, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. p. 206.
- [3] Güneyisi, E., et al., *Combined effect of steel fiber and metakaolin incorporation on mechanical properties of concrete*. Composites Part B: Engineering, 2014. **56**(0): p. 83-91.
- [4] Siddique, R. and J. Klaus, *Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review*. Applied Clay Science, 2009. **43**(3–4): p. 392-400.
- [5] Nunes, S., Ribeiro, F., Azevedo, D., Rio, J. Betofibra-Betões de elevado desempenho reforçado com fibras em soluções inovadoras: conceção, caracterização e controlo de qualidade, Relatório técnico, 15/03/2013
- [6] Proença, A.M., *A influência do metacaulino no controlo da reação alcali-silica*, in *1º jornadas de Materiais de Construção*, E. FEUP, Editor. 2011: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [7] Kang, S.T., et al., *The effect of fibre distribution characteristics on the flexural strength of steel fibre-reinforced ultra high strength concrete*. Construction and Building Materials, 2011. **25**(5): p. 2450-2457.
- [8] Filipe Ribeiro , C.S., Sandra Nunes , João Rio, Adriano Carvalho, *Influência da distribuição e orientação das fibras no comportamento à tração do HPFRC*. Anais do 56º congresso brasileiro do concreto, 2014.
- [9] Gomes, F.A.A., *Betão auto-compactável reforçado com fibras*. 2010, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. p. 120.
- [10] Rashad, A.M., *Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition – A comprehensive overview*. Construction and Building Materials, 2013. **41**(0): p. 303-318.
- [11] Sabir, B.B., S. Wild, and J. Bai, *Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review*. Cement and Concrete Composites, 2001. **23**(6): p. 441-454.
- [12] Srivastava1, V., R.K. , and a.V.C. Agarwal1, *Metakaolin inclusion: Effect on mechanical properties of concrete*. 2012.
- [13] Gutiérrez, R.M., L.N. Díaz, and S. Delvasto, *Effect of pozzolans on the performance of fiber-reinforced mortars*. Cement and Concrete Composites, 2005. **27**(5): p. 593-598.
- [14] Phelps, R.J., *Optimization of water and metakaolin content to achieve high performance in concrete*. 2006, Southern Illinois University at Carbondale: Ann Arbor. p. 83-83 p.
- [15] Al-Akhras, N.M., *Durability of metakaolin concrete to sulfate attack*. Cement and Concrete Research, 2006. **36**(9): p. 1727-1734.
- [16] Fernandes, N.F.A., *Comportamento de betão com metacaulino português*. Dissertação de mestrado, Departamento d Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, 2013.
- [17] E. Neeman, Kay Willie. *The path to Ultra-high performance fiber reinforced concrete: Five decades of progress*. Ultra-high performance concrete and nanotechnology in construction. March 7-9. 2012. Kassel.
- [18] Jung Park, S.K., K koh, S Kim. *Influence of the ingredients on the compressive strenght of UHPC as a fundamental study to optimize the mixing proportion*. in *Proceedings of the second International symposium on Ultra High Performance Concrete*. 2008. Kassel.
- [19] Sobolev, K., *The developepment of a new method for the proportioning of high performance concrete mixtures*. Cement and Concrete Composites, 2004. **26**(7): p. 901-907.
- [20] Rougeau, P., Borys B. *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*. 2004. Kassel.
- [21] Abrishambaf, A., J.A.O. Barros, and V.M.C.F. Cunha, *Relation between fibre distribution and post-cracking behaviour in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels*. Cement and Concrete Research, 2013. **51**(0): p. 57-66.

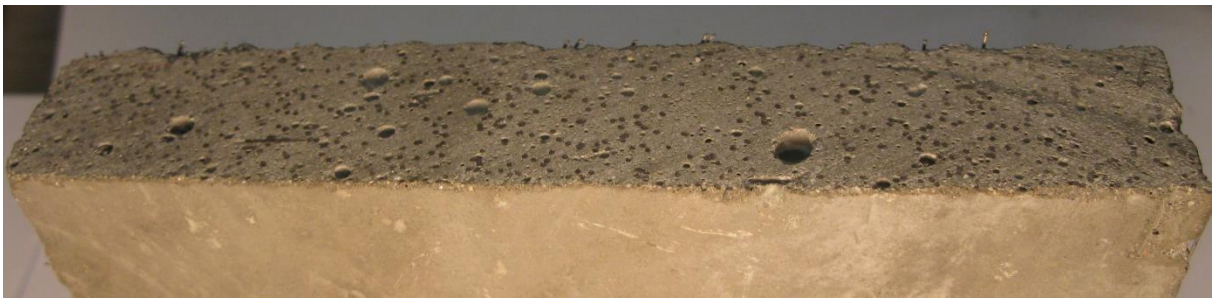
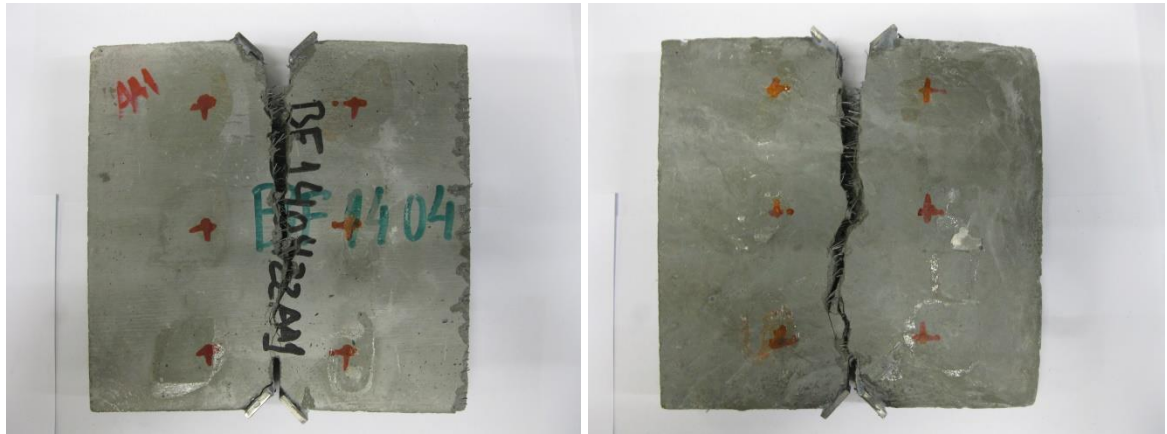
- [22] Şanal, İ. and N. Özyurt Zihnioğlu, *To what extent does the fiber orientation affect mechanical performance?* Construction and Building Materials, 2013. **44**(0): p. 671-681.
- [23] Sebaibi, N., M. Benzerzour, and N.E. Abriak, *Influence of the distribution and orientation of fibres in a reinforced concrete with waste fibres and powders.* Construction and Building Materials, 2014. **65**(0): p. 254-263.
- [24] Walter, R., et al., *Wedge splitting test for a steel–concrete interface.* Engineering Fracture Mechanics, 2005. **72**(17): p. 2565-2583.
- [25] Skoček, J. and H. Stang, *Inverse analysis of the wedge-splitting test.* Engineering Fracture Mechanics, 2008. **75**(10): p. 3173-3188.
- [26] Liberato Ferrara, M.d.P., Marco G. L. Lamperti, *Double edge wedge splitting (DEWS): an indirect tension test to identify post cracking behaviour of fibre reinforced cementitious composites.* Materials and Structures, 2013. **2**.
- [27] Maria, S.A.A., *Design of Ecological Concrete by Particle Packing Optimization.* 2011, Technische Univiversiteit Delft.
- [28] Figueiras, H., *Linking fresh and durability properties of paste to scc mortar.* Elsevier Editorial Cement and Concrete Composites, 2014. 45(0):p.209-226.
- [29] Brooks, J.J., M.A. Megat Johari, and M. Mazloom, *Effect of admixtures on the setting times of high-strength concrete.* Cement and Concrete Composites, 2000. **22**(4): p. 293-301.
- [30] Naaman, A. *The Path to Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC): Five Decades of Progress.* in *Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials.* 2012. Kassel.
- [31] Kang, S.T., et al., *The effect of fibre distribution characteristics on the flexural strength of steel fibre-reinforced ultra high strength concrete.* Construction and Building Materials, 2011. **25**(5): p. 2450-2457.
- [32] Lataste, J., Behloul, M., Breysse, D. *Characterisation of fibres distribution in a steel fibre reinforced concrete with electrical resistivity measurements,* NDT&E International, 31/10/2007, 638-647, França.



## **ANEXOS**

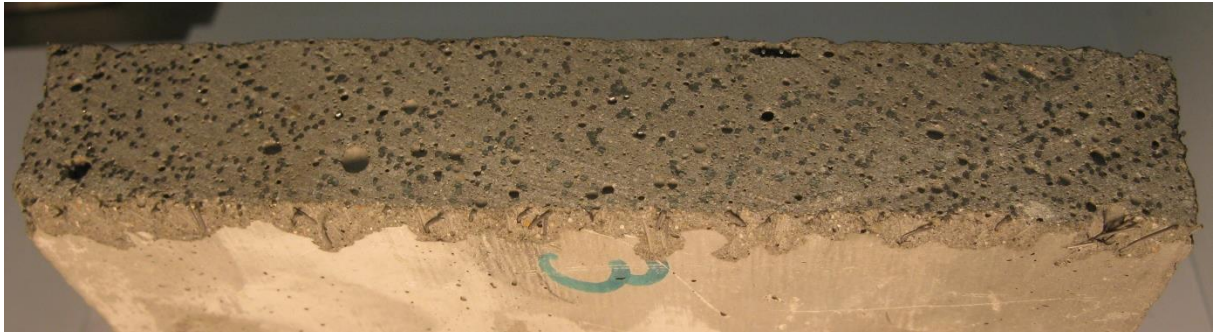
Anexo A1 – Fotografias dos provetes do ensaio DEWS depois de ensaiados

**A1**

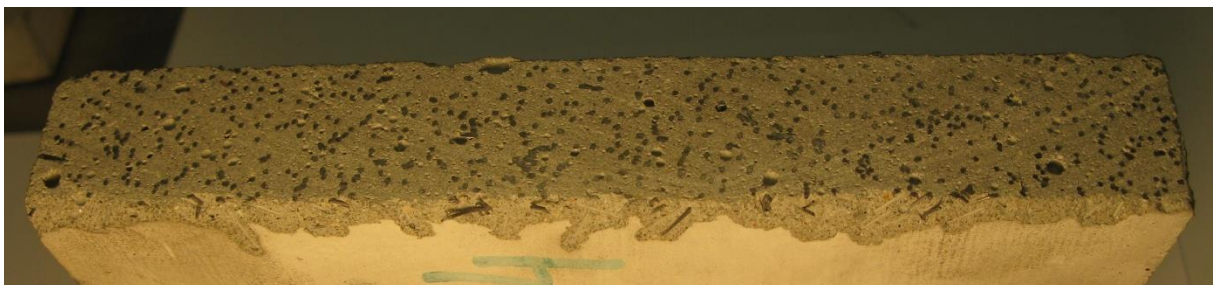


Provete BF140422AA1 – 3% fibras sem orientação em composição com metacaulino





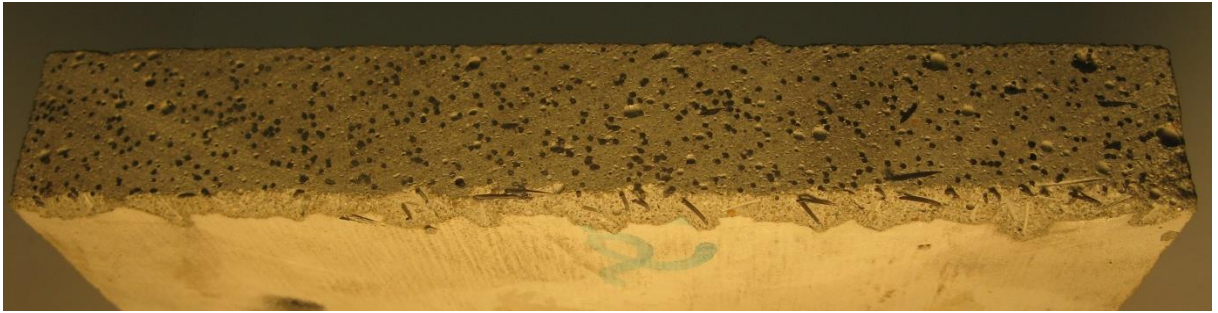
Provete 140422AA2 – 3% d fibras não orientadas em composição com metacaulino



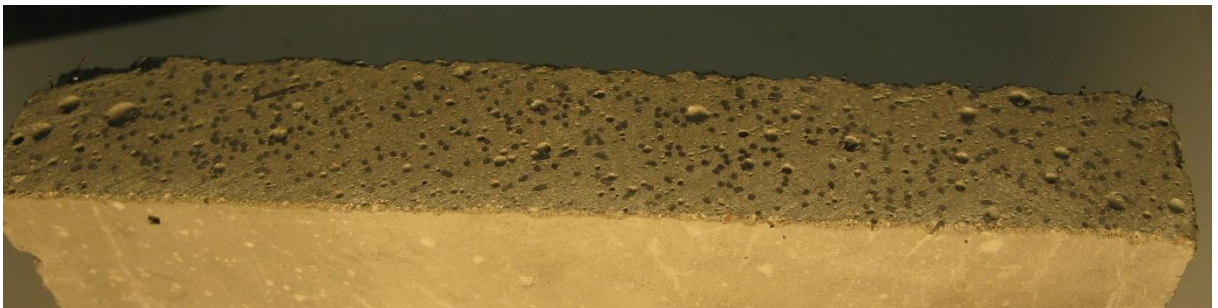
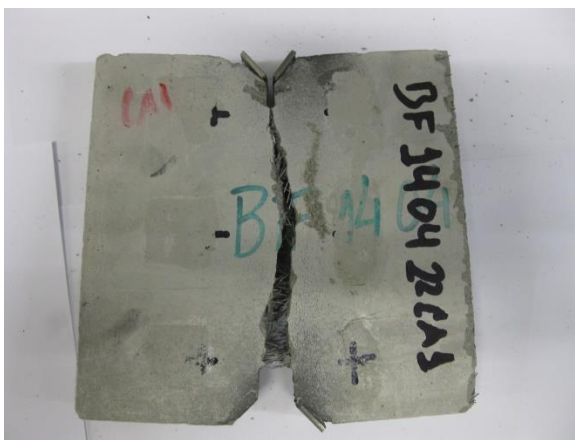
Provete BF140422BA1 – 3% de fibras não orientadas em composição com metacaulino





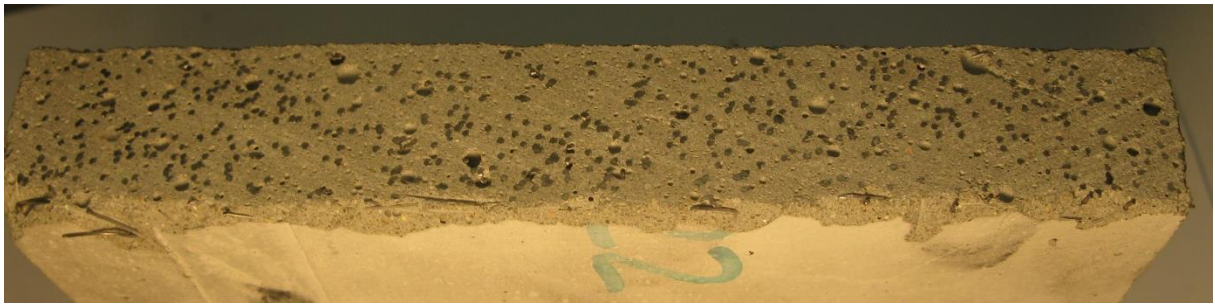


Provete BF140422BA2 – 3% de fibras não orientadas em composição com metacaulino

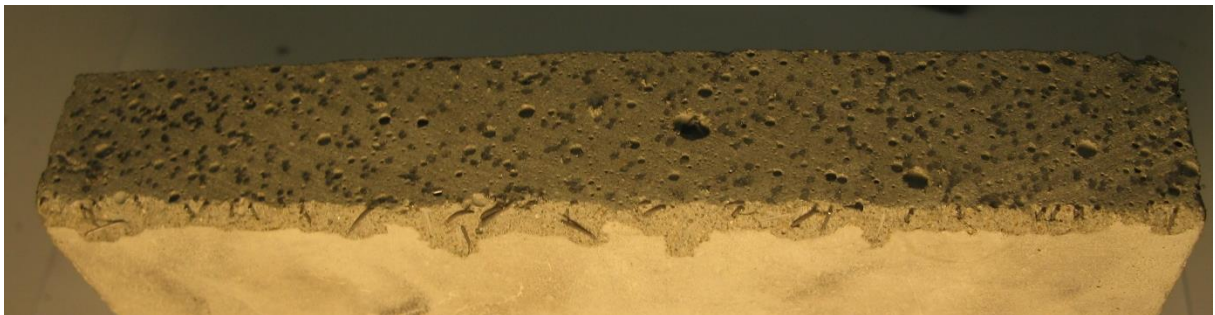
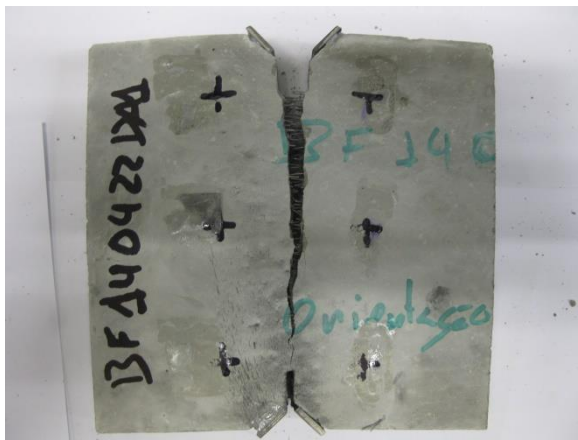


Provete BF140422CA1 – 3% de fibras não orientadas em composição com metacaulino

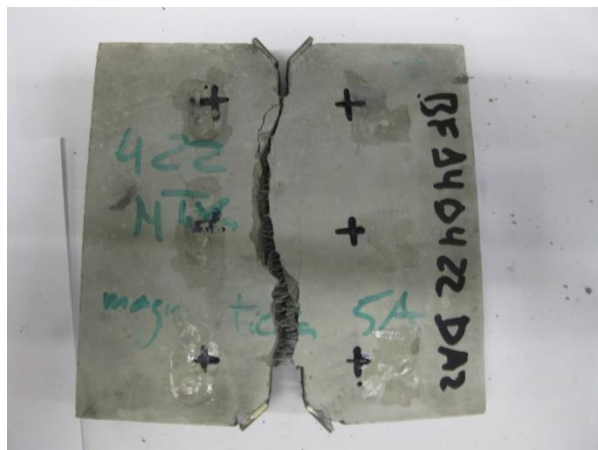




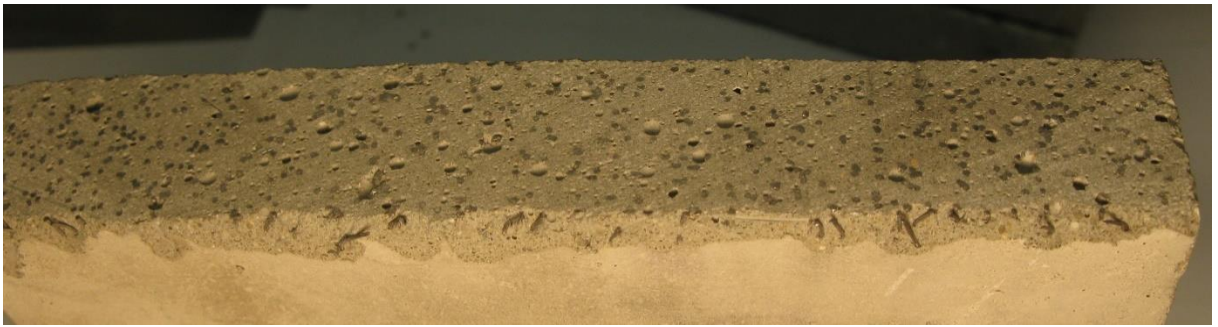
Provete BF140422CCA2 – 3% de fibras não orientadas em composição com metacaulino



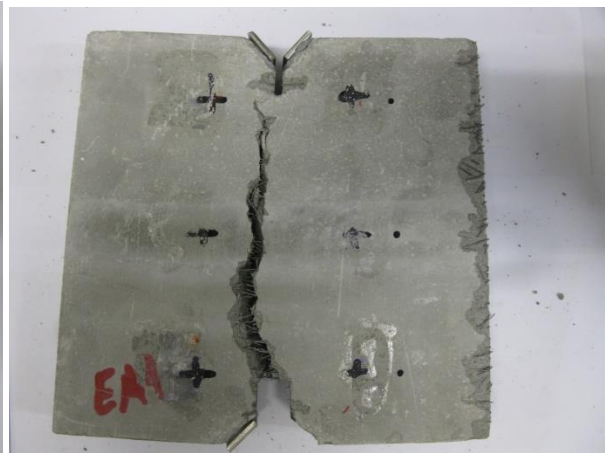
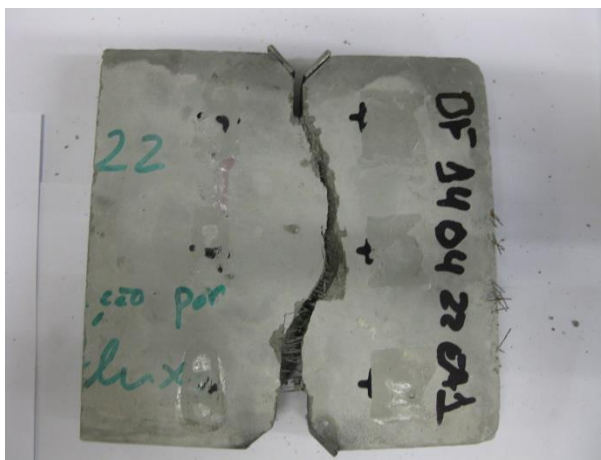
Provete BF140422DA1 – 3% de fibras com orientação magnética em composição com metacaulino



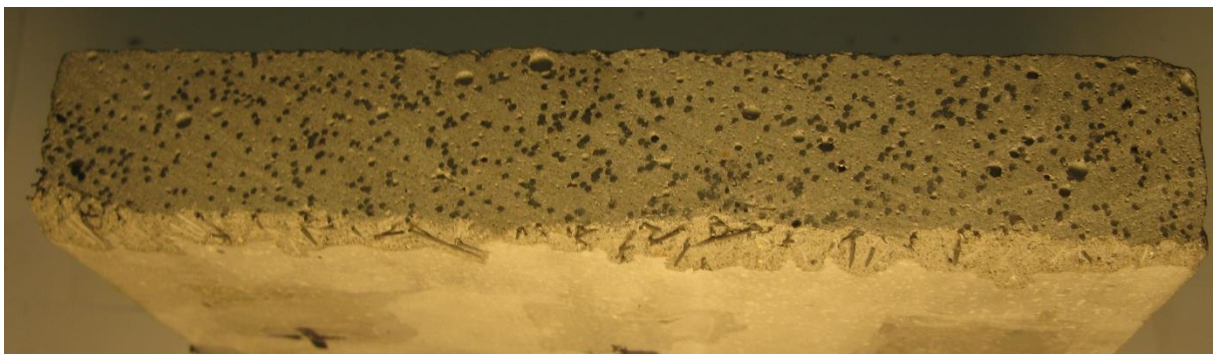
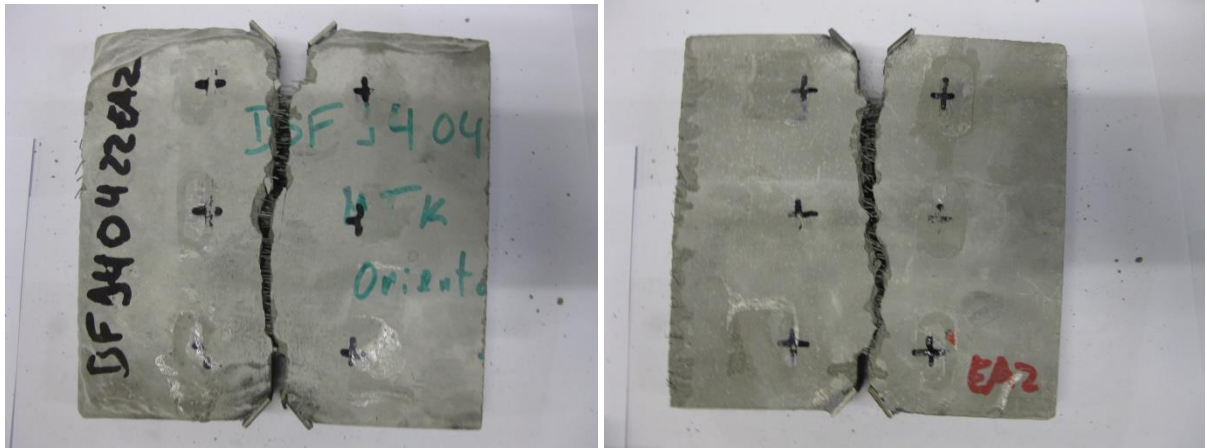




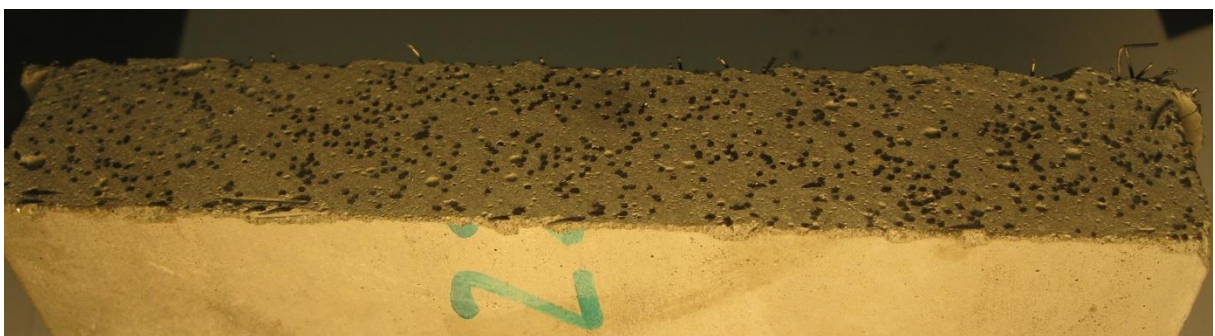
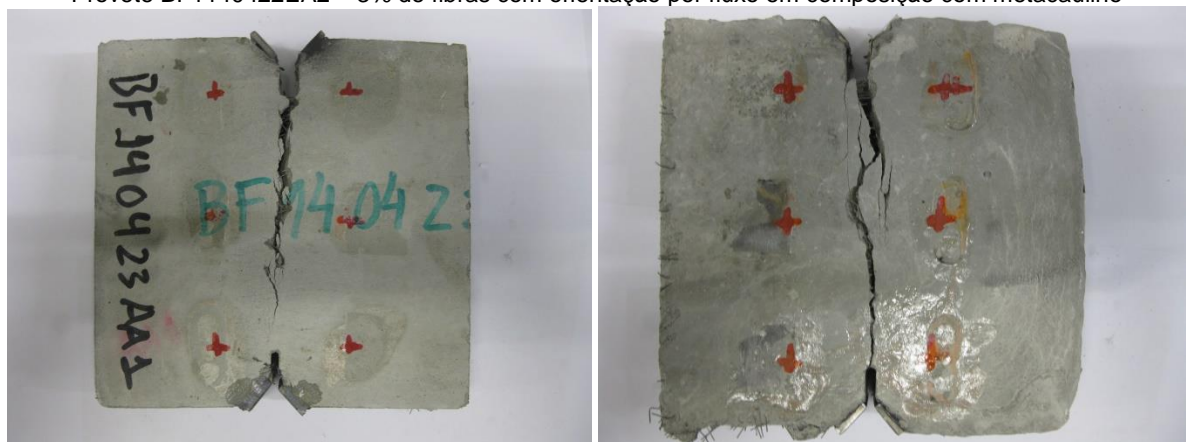
Provete BF140422DA2 – 3% de fibras com orientação magnética em composição com metacaulino



Provete BF140422EA1 – 3% de fibras com orientação por fluxo em composição com metacaulino

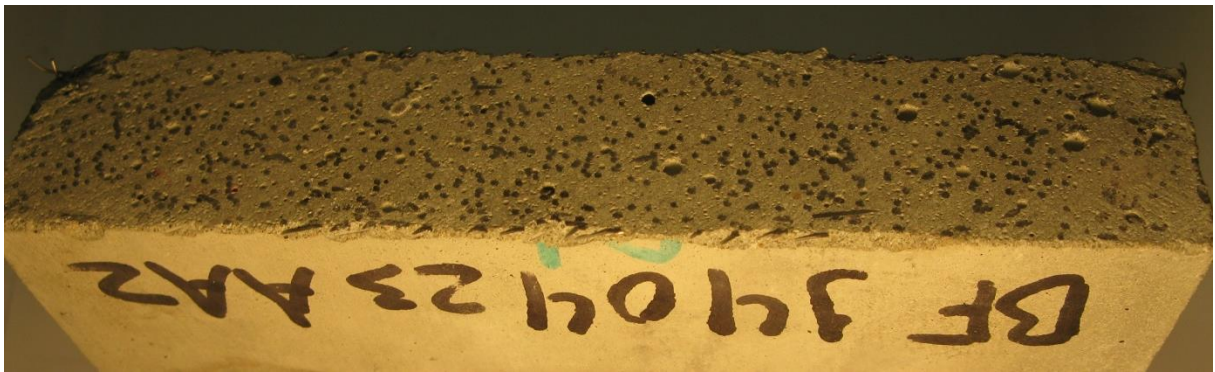


Provete BF1140422EA2 – 3% de fibras com orientação por fluxo em composição com metacaulino

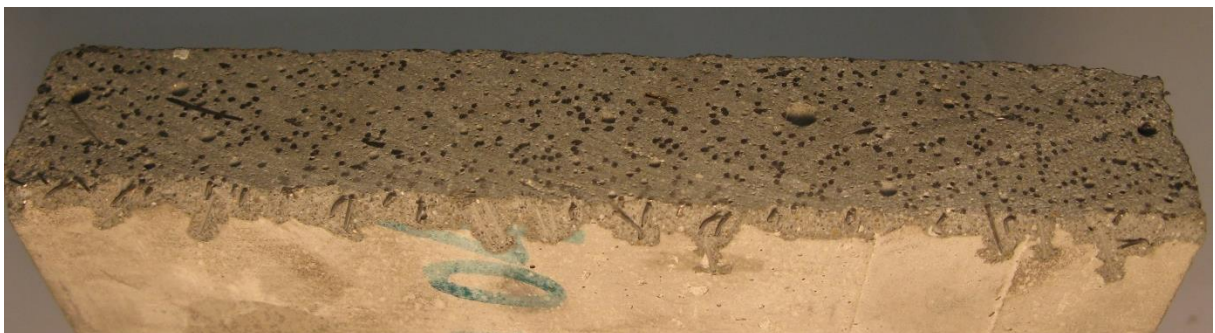


Provete BF1140423AA1 – 3% de fibras não orientadas em composição com sílica de fumo



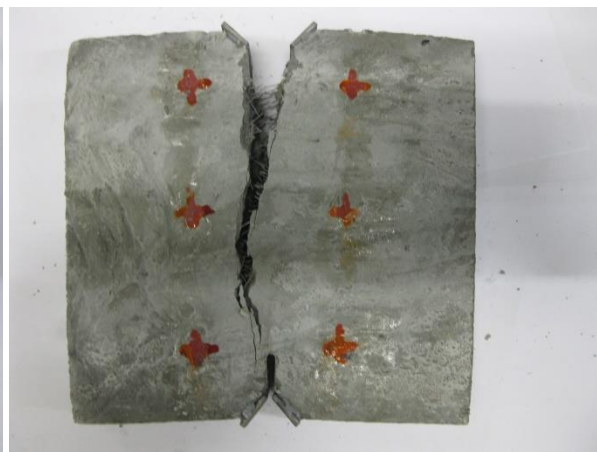


Provete BF140423AA2 – 3% de fibras não orientadas em composição com sílica de fumo

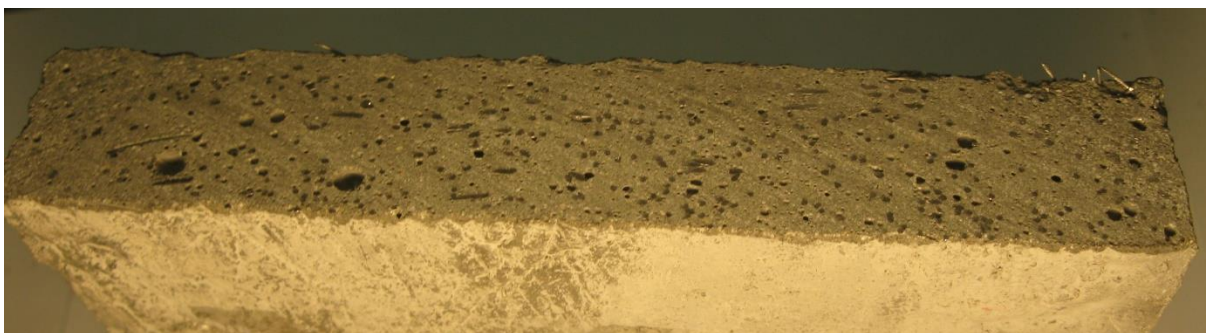
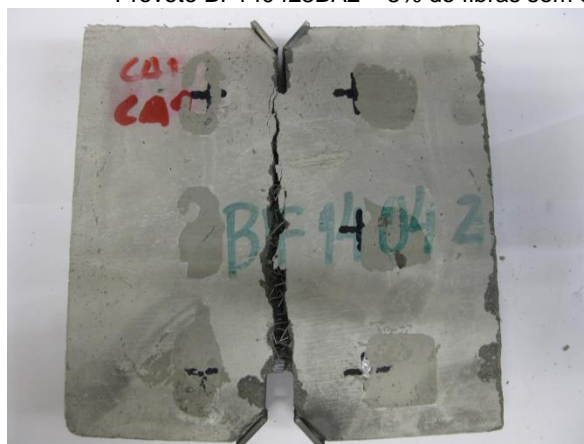


Provete BF140423BA1 – 3% de fibras não orientadas em composição com sílica de fumo

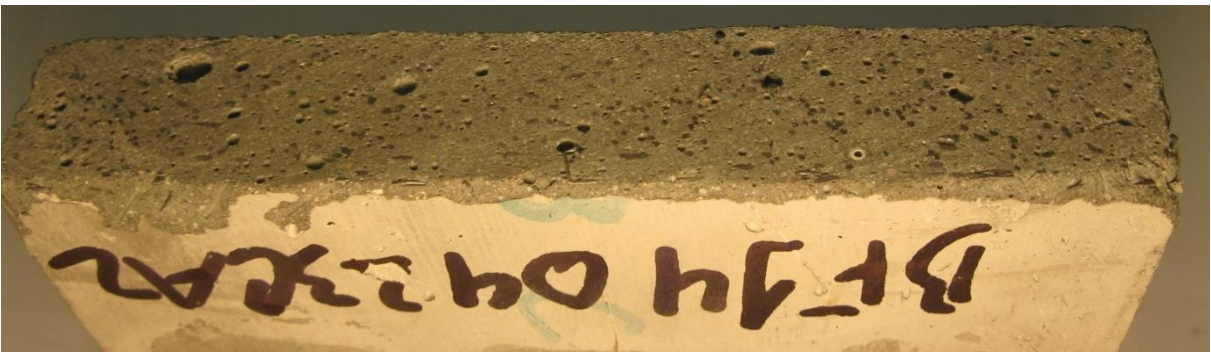
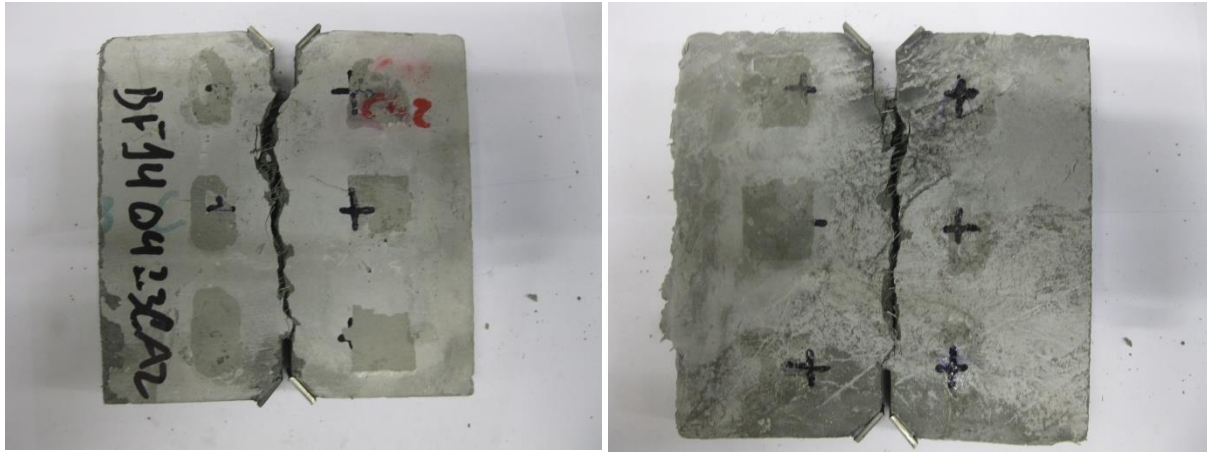




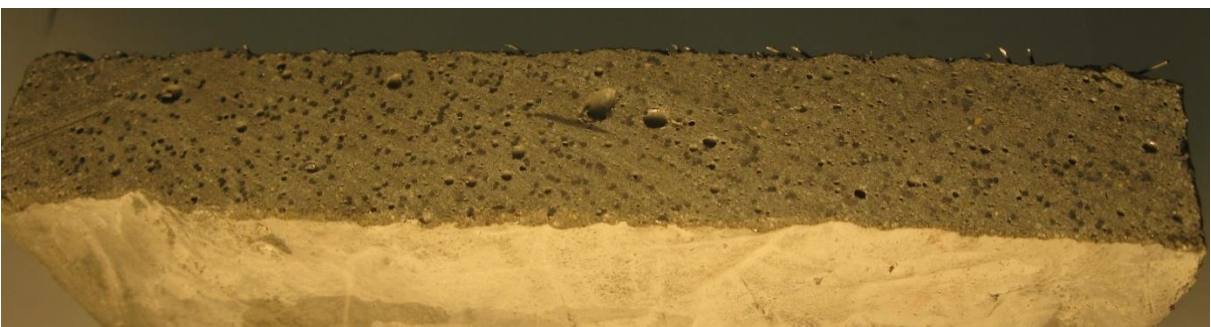
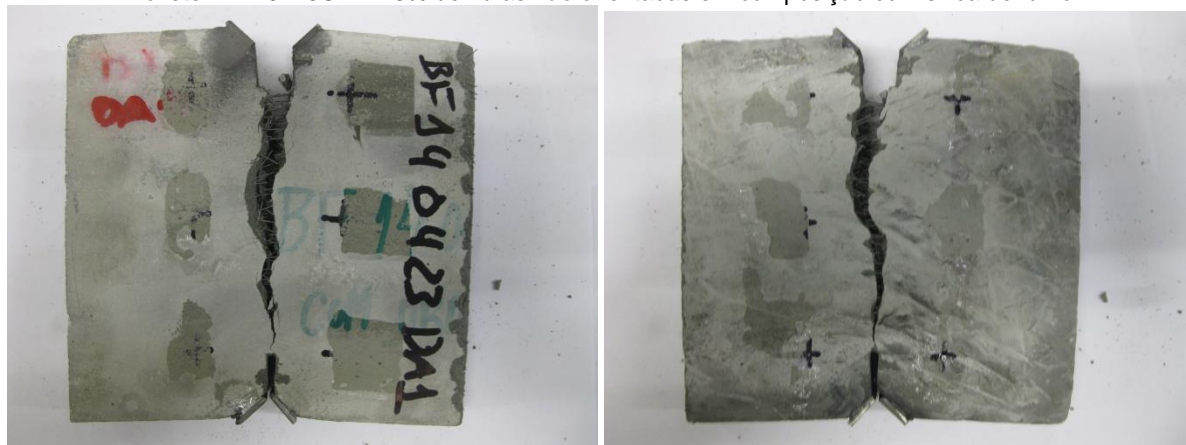
Provete BF140423BA2 – 3% de fibras sem orientação em composição com sílica de fumo



Provete BF140423CA1 – 3% de fibras sem orientação em composição com sílica de fumo

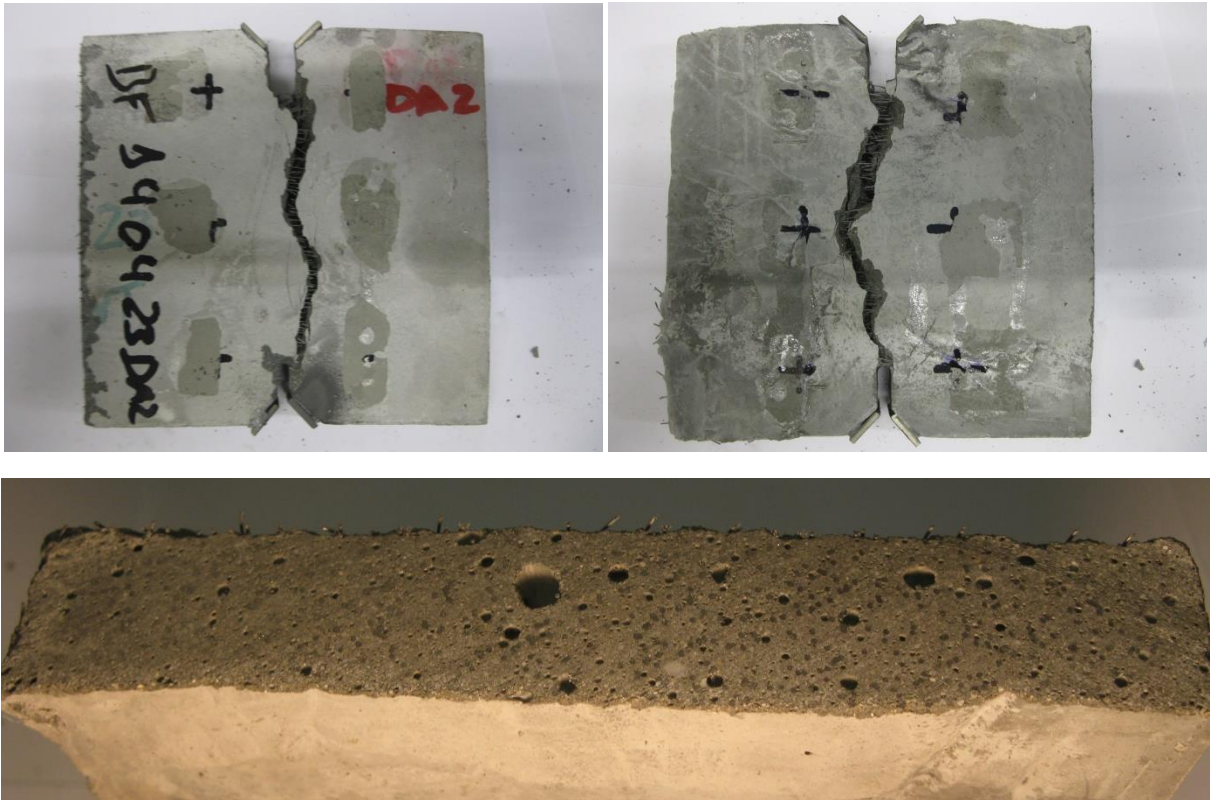


Provete BF140423CA2 – 3% de fibras não orientadas em composição com sílica de fumo



Provete BF140423DA1 – 3% de fibras com orientação magnética em composição com sílica de fumo





Provete BF140423DA2 – 3% de fibras com orientação magnética em composição com sílica de fumo